

Badania nad bonitacją drzewostanów w świetle literatury

Site index research: a literature review

Wojciech Kędziora* , Robert Tomusiak , Tomasz Borecki 

Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Instytut Nauk Leśnych, Katedra Urządzania Lasu, Dendrometrii i Ekonomiki Leśnictwa, ul. Nowoursynowska 159; 02-776 Warszawa, Polska

*Tel. +48 22 5938204, e-mail: wojciech.kedziora@wl.sggw.pl

Abstract. The purpose of this paper was to review literature covering the topic of site index with particular emphasis on Scots pine, the most important forest-forming species in Poland. We discuss the history of the site index, research on various tree species, statistical modelling methods, the spatial application of site index and age impact assessment.

The history of research on the site index of forest species is long and dates back to the 18th century. Many researchers thought that determining the quality of the habitat is very important from the point of view of rational forest management. The site index, as a measure of the potential of the habitat on which the forest grows, is one of the most important characteristics of forest stands. The site index depends on the selected model, but is most often expressed as the average or top height of trees of a given species at a certain age.

In our review, we point out several insufficiencies of studies on the site index, external influences and the connection of the site index with spatial conditions. Furthermore, research conducted so far has not explicitly confirmed that there is a relationship between the site index of pine stands and their geographical location in Poland. More research on the site index, especially in regard with climate change, is needed.

Keywords: forest site index, tree growth, forest site quality, forest site productivity

Słowa kluczowe: wskaźnik bonitacji drzewostanów, wzrost drzew, jakość drzewostanów, produktywność drzewostanów

1. Wstęp

Dynamiczne zmiany zachodzące w dostępności do informacji pozwalają na prowadzenie badań w coraz szerszym zakresie. Dzięki nowoczesnym metodom zbioru danych terenowych z dużej liczby powierzchni próbnych wiele problemów, które jeszcze do niedawna były bez odpowiedzi, jest rozwiązywanych. Jednym z takich ważnych problemów naukowych dla leśnictwa jest pełniejsza charakterystyka bonitacji i próba przestrzennego scharakteryzowania wzrostu lasów na podstawie tej cechy.

W biocenozie wszystkie gatunki drzew są jednakowo ważne, jednak z punktu widzenia gospodarczego niektóre z nich traktowane są priorytetowo. W Polsce spośród wszystkich gatunków lasotwórczych sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* L. zasługiwała i zasługuje na szczególne uznanie. Ze względu na występujące gleby oraz klimat,

tworzące siedlisko, sosna jest najczęstszym gatunkiem w polskich lasach. Jej wartość dla polskiego leśnictwa podnosi mało problematyczny sposób prowadzenia oraz wysoka produktywność i gospodarcza użyteczność.

Dokładniejsze poznanie czynników wpływających na wzrost sosny przyczyni się do wzbogacenia wiedzy podstawowej o tym gatunku, a tym samym pozwoli na efektywniejsze gospodarowanie. Bonitacja drzewostanów, charakteryzująca możliwości wzrostowe gatunku, jest dobrym miernikiem wpływu otaczającego środowiska na życie drzew. Stała wielkość bonitacji w czasie wyraża niezmienność warunków środowiska, podczas gdy jej wahania świadczą o tym, że niektóre cechy otaczającego ekosystemu podlegają zmianom. Poznanie zmienności i zależności bonitacji od czynników zewnętrznych może być pomocne w zrozumieniu preferencji sosny. Jest to szczególnie aktualne i ważne przy obecnych dynamicznych zmianach klimatu związanych z jego ocieplaniem.

Wpłynęło: 27.02.2020 r., zrecenzowano: 25.03.2020 r., zaakceptowano: 2.04.2020 r.

Celem pracy jest przegląd literatury dotyczącej bonitowania ważnych gatunków leśnych, ze szczególnym uwzględnieniem sosny, najważniejszego gatunku lasotwórczego w Polsce. Dotychczasowy stan wiedzy o bonitacji sosny w Polsce wydaje się niewystarczający, a aktualne możliwości kontynuacji tych badań mogą tę wiedzę znacznie poszerzyć.

2. Ewolucja mierników potencjału produkcyjnego lasu

Badania nad bonitacją prowadzone były już w XVIII w. przez Oettelta (1764), który określił wysokość drzew jako wskaźnik „dobroci gleby”. W wieku XIX nastąpił rozwój nauk leśnych, który zmienił podejście do problemu bonitacji. Heyer jako pierwszy zaobserwował powiązanie pomiędzy przyrostem wysokości a wzrostem miąższości (Heyer 1841). Uważał, że określenie jakości siedliska jest ważne z punktu widzenia jego produktywności (Heyer 1845). Franz von Baur opisywał przeciętną wysokość jako najdokładniejszy i jedynie właściwy wskaźnik nie tylko do oceny normalnie wzrastającego drzewostanu, lecz także bonitacji (Baur 1881). W metodzie tej bonitację podzielono na klasy i każdej z nich przyporządkowano równe przedziały przeciętnej wysokości. Przedziały te, wraz z wiekiem drzewostanu, proporcjonalnie zwiększały swój zakres wysokości. Graficzna interpretacja przypominała zwiększające swój zakres pasma, stąd też jej nazwa – metoda pasowa. Zakładała ona, że wysokość drzewostanu wzrasta zgodnie z wyznaczoną krzywą zmiany wysokości oraz że drzewostany w określonym wieku charakteryzują się podobną produktywnością. Od tego czasu, pomimo początkowego sceptycyzmu (np. Hartig 1892) zaczęto utożsamiać bonitację wysokościową z produktywnością. Metoda ta, nazywana „metodą fitocentryczną”, polega na pomiarze roślinności rosnącej na danym terenie (Skovsgaard, Vanclay 2008). W odróżnieniu od „metody geocentrycznej”, opartej na właściwościach gleby i klimatu, jest często łatwiejsza do zastosowania. Metoda fitocentryczna najczęściej zakłada pomiar wielkości plonu roślinnego. W gospodarce rolnej jest to często praktykowany sposób, jednak przy odmienności typów gospodarstw rolnej i leśnej trudny do zastosowania. Rokroczne zbiory plonów w rolnictwie umożliwiają dokonanie wieloletnich analiz zmian produktywności. Taki sposób eksperymentowania w drzewostanach wymagałby wielu wieków badań. W leśnictwie próbę rozwiązania problemu stanowił pomiar wielkości plonu wyrażony miąższością (Assmann 1968) lub przeciętnym przyrostem całkowitej produkcji obliczonym dla wieku 100 lat (Philipp 1893). W czasach gdy w hodowli lasu stosowano słabe trzebieże, pozwalając części drzew opanowanych pozostać w drzewostanie, sposób ten dość dobrze odzwierciedlał możliwości produkcyjne siedliska. Jednak od kiedy zaczęto stosować umiarkowane i silne trzebieże, zdarzało się, że na siedlisku o potencjalnie wyższej produktywności stan zapasu był mniejszy niż na siedlisku

o niższym potencjale. Okazało się, że zasobność nie określa precyzyjnie potencjału produkcyjnego siedliska, ponieważ intensywność zabiegu miała istotny wpływ na wzrost zasobów drzewnych – po silnych trzebieżach potencjał był często niedoszacowany, przy słabych trzebieżach zaś przeszacowany (Magin 1958). W wyniku poszukiwania bardziej dogodnej miary do określania bonitacji wybrano przeciętną wysokość drzewostanu jako miarę, która ulega mniejszym wpływom zewnętrznym.

Pomiar bonitacji na podstawie miąższości bazuje na Prawie Eichhorna (sformułowanym dla jodły), które mówi, że pewnej średniej wysokości drzewostanu dla wszystkich klas siedliska odpowiadają jednakowe miąższości drzewostanu (Eichhorn 1902). W późniejszych latach Gerhardt rozszerzył je o świerk oraz sosnę (Gehrhardt 1909, 1921) oraz reformułował je na „rozszerzone prawo Eichhorna” mówiące o tym, że istnieje zależność pomiędzy produktywnością a wysokością drzewostanu uwarunkowaną siedliskiem, co uodowodnił Assmann (1955, 1959).

3. Bonitacja wzrostowa

Bonitacja wzrostowa, rozumiana jako wysokość drzewostanu w konkretnym wieku, jest dziś najbardziej rozpowszechnionym sposobem oceny jakości siedliska leśnego. Aktualnie istnieją dwa podejścia do jej pomiaru i w obu stosuje się sposób wskaźnikowy – należy zmierzyć drzewa próbne i sprawdzić do jakiej bonitacji należą.

Pierwszy sposób zakłada pomiar średniej wysokości i przypisanie jej do konkretnej klasy bonitacji. Rodzi to jednak pewne konsekwencje. W czasie naturalnego wzrostu drzew najstarsze drzewa przegrywają konkurencję i wydzielają się z drzewostanu. Procesy te symuluje się w czasie zabiegów pielęgnacyjnych. Przy silnej trzebieży dolnej może to prowadzić do nagłego i znacznego powiększenia się przeciętnej wysokości. Przykładowo, silna trzebież dolna w 65-letnim drzewostanie zmienia przeciętną wysokość z 24,5 m do 25,9 m, co podwyższa bonitację o 1/2 klasy (Assmann 1968).

Drugi sposób bazuje na określeniu wysokości górnej drzewostanu, rozumianej jako średnia wysokość określonej liczby najgrubszych drzew na powierzchni 1 ha. W tym przypadku, na skutek trzebieży bądź naturalnych procesów wydzielania się drzew, nastąpią jedynie nieznaczne przesunięcia wyników bonitacji. W badaniach z powierzchni doświadczalnych w Sachsenried 2 ustalono, że różnica wysokości górnej i przeciętnej, przy odpowiednim nasileniu zabiegów hodowlanych, może zmniejszyć się z poziomu 2,1 m do 1,0 m (Assmann 1968). Dalsze badania nad zastosowaniem wysokości średniej i górnej pokazały, że dla różnych zabiegów trzebieżowych można uzyskać różnice w bonitacji dochodzące do 3,2 m.

W obu metodach problem może stanowić zmienność osobnicza pod względem wzrostu wysokości. Dynamika wzrostu

odbiegająca od przyjętego „wachlarza” bonitacji skutkuje jej zmianą, najczęściej spadkiem, nawet o 0,7 stopnia jakości. Dodatkowo, np. pogorszenie stosunków wodnych w czasie wzrostu drzewostanu, może powodować obniżenie bonitacji (Assmann 1968).

Nie tylko zmiany poziomu lustra wody mogą wpływać na wielkość bonitacji. Okazuje się, że przyrost wysokości różni się w zależności od klimatu. Porównano dwa rodzaje tablic zasobności z różnych regionów: Hummela i Christiego (1953) dla drzew iglastych Wielkiej Brytanii oraz Wiedemanna (1936) dla świerka w Niemczech i okazało się, że ich tempo wzrostu jest odmienne (Magin 1957).

Problematiczny jest również fakt, że w różnych tablicach używano zarówno różnej liczby klas bonitacji, jak i odmiennej szerokości przedziałów charakteryzujących klasy. Schober (za: Assmann 1968) zaproponował, aby odległości między poszczególnymi klasami bonitacji wynosiły 4 m w wieku 100 lat (4,5 metra dla świerka). Inną propozycją były bonitacje absolutne (w odróżnieniu od klasowych) określające wysokość drzewostanu w wieku rębności. Problemem okazała się ocena bonitacji przy ewentualnej zmianie wieku rębności. Trudności występowały również przy porównywaniu bonitacji absolutnej między gatunkami. Próbą ujednoczenia różnych propozycji był postulat Wecka, aby bonitacja absolutna była mierzona jako przeciętna wysokość drzewostanu w wieku 100 lat (Weck 1948). Stwarzało to jednak problemy omówione wcześniej. Dlatego też aktualnie najbardziej rozpowszechnioną formą określania bonitacji drzewostanów jest propozycja Assmanna. Zakłada ona, że bonitacja wzrostowa drzewostanów to wysokość górna (wysokość 100 najgrubszych drzew na 1 ha) w wieku 100 lat (Assmann 1959).

System absolutnych bonitacji może być przyjęty dla bonitacji wysokościowej (Assmann 1959; Skovsgaard, Vanclay 2008) i jednocześnie jest jednoznaczny w oznaczeniu oraz łatwy w pomiarze, można go porównywać bez dodatkowych przeliczeń. Należy zauważyć, że w leśnictwie pożądaną do określenia cechą jest bonitacja siedliska, określana przy pomocy bonitacji drzewostanu. Ta ostatnia obarczona jest pewnym błędem, np. niedostosowaniem składu gatunkowego do siedliska lub też zaburzonymi warunkami wzrostu w poprzednich okresach (Gieruszyński 1959). Z badań tych wynika, że wskaźnik bonitacji nie jest przystosowany do różnych gatunkowo drzewostanów, współczynnik zadrzewienia nie jest brany pod uwagę, wskaźnik bonitacji nie jest stały i może zmieniać się w czasie, nie można wprost porównywać wskaźnika bonitacji dla różnych gatunków. Należy pamiętać, że problemem jest precyzyjne określenie wieku drzewostanu.

Abstrahując od tych ograniczeń, wskaźnik bonitacji jest użytecznym miernikiem pozwalającym na użycie prostej wartości numerycznej, którą łatwo pomierzyć i zrozumieć leśnikowi. Dopóty będzie on w użyciu, dopóki nie zostanie zastąpiony miernikiem pozbawionym powyższych ograniczeń, którego wyliczenie będzie równie łatwe (Avery et

al. 2019). Stąd też, wskaźnik bonitacji jest najczęściej wyrażany jako górna wysokość drzew danego gatunku w konkretnym wieku (Bruchwald, Kliczkowska 1997; Bruchwald et al. 1999; Sharma et al. 2012; Socha et al. 2017).

Badania nad bonitacją w ujęciu klasowym i absolutnym prowadzone są, jak wcześniej wspomniano, przynajmniej od XVIII w. Głównym efektem tych badań jest budowa modeli wskaźnika bonitacji (krzywych bonitacyjnych) dla różnych gatunków, np. daglezi zielonej *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco (Monserud 1984; Means, Helm 1985; Milner 1992), sosny żółtej *Pinus ponderosa* Dougl. ex C. Lawson (Milner 1992), modrzewia zachodniego *Larix occidentalis* Nutt. (Milner 1992), sosny wydmowej *Pinus contorta* Douglas (Milner 1992), sosny taeda *Pinus taeda* L. (Popham et al. 1979; Cao et al. 1997), sosny długoigielnej *Pinus palustris* Mill. (Cao 1997), sosny kalifornijskiej *Pinus radiata* D. Don (Burkhart, Tennent 1977), sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L. (Bruchwald 1979; Elfving, Kiviste 1997; Socha, Orzeł 2013), buka pospolitego *Fagus sylvatica* L. (Nord-Larsen 2006), świerka zwyczajnego *Picea abies* L. H. Karst (Kliczkowska, Bruchwald 2000; Socha et al. 2015) czy olchy czarnej *Alnus glutinosa* L. (Socha, Ochał 2017).

W pracy Cieszewskiego i Zasady (2002) przeprowadzono przekształcenie anamorficznego modelu bonitacyjnego Bruchwalda i in. (2000a) do postaci dynamicznej, pozwalającej uzyskać wartość wskaźnika bonitacji dla dowolnie pomierzonej pary ‘wiek – wysokość’ w mniej pracochłonny sposób. Tablice zasobności Szymkiewicza udało się Cieszewskiemu i Zasadzie (2003a) przekształcić w model bonitacyjny. W pracy Cieszewskiego i Zasady (2003b) zaproponowano użycie uniwersalnej metody różnic algebraicznych do wyprowadzenia ogólnych dynamicznych równań bonitacyjnych.

Badania nad zmiennością cech drzew i drzewostanów sosnowych w Polsce, uwzględniające również bonitację, są prowadzone od relatywnie długiego czasu, co warunkuje potencjalnie dużą ilość materiału porównawczego (Bruchwald 1977; Keller 1991; Bruchwald, Kliczkowska 2000; Socha, Orzeł 2011). W piśmiennictwie wyraźnie zaznacza się trend badań nad samymi modelami bonitacyjnymi sosny, zarówno w skali lokalnej (Sewerniak 2008; Beker, Andrzejewski 2013), jak i w skali kraju (m.in. Cieszewski, Zasada 2003a). Z podobnych badań w literaturze znaleźć można jedynie takie, które swoim zasięgiem ograniczają się do wybranych regionów (Sewerniak, Piernik 2012; Socha, Orzeł 2013). Dotychczasowe badania nad zmiennością bonitacji drzewostanów sosnowych w skali kraju wskazały na konieczność włączenia dodatkowych parametrów środowiskowych i drzewostanowych, mogących potencjalnie wpływać na zróżnicowanie bonitacji drzewostanów sosnowych (Bruchwald et al. 2000a).

Badaniami wysokości górnej drzewostanu zajmowali się m.in. Bruchwald (1979), Socha (2005) oraz Beker (2007).

Ten ostatni zaproponował wysokość górną biologiczną – drzew górujących i panujących wg Krafta (1884) – jako najdokładniejszą w całym okresie życia drzewostanu, jednak trudną do zmierzenia ze względu na dużą pracochłonność.

Socha i współpracownicy (2015) w swoich badaniach opracowali modele bonitacyjne dla podstawowych gatunków lasotwórczych w Polsce (sosny, jodły *Abies alba* Mill., jesionu *Fraxinus excelsior* L., osiki *Populus tremula* L., brzozy *Betula* L., olszy czarnej, dębu *Quercus* L., buka, modrzewia *Larix decidua* Mill., świerka, robinii akacjowej *Robinia pseudoacacia* L., dębu czerwonego *Quercus rubra* L., daglezi *Pseudotsuga* Carriere, graba *Carpinus betulus* L., lipy *Tilia* L. i klonu *Acer* L.). Udało im się zbudować matematyczny model wskaźnika bonitacji na podstawie danych z tablic zasobności używanych w Polsce. Dla większości gatunków wykorzystali oni zmodyfikowany model Cieszewskiego (Cieszewski, Zasada 2003b), który dawał najlepsze rezultaty. Opracowali również modele bonitacyjne dla głównych gatunków lasotwórczych Polski, bazując na najnowszym materiale empirycznym (Socha et al. 2017).

W badaniach przeprowadzonych w drzewostanach południowej części Polski (Socha, Orzeł 2013) opracowano zestaw dynamicznych krzywych bonitacyjnych dla sosny. Co więcej, zauważono, że model tablicowy Schwappacha (1943) wykazuje mniejsze tempo wzrostu w młodości i większe przy starszych drzewostanach. Natomiast matematyczny model Bruchwalda (Bruchwald et al. 2000a,b), budowany według innych zasad, wykazuje znaczne rozbieżności pomiędzy prognozowanym a rzeczywistym przebiegiem wzrostu.

W badaniach prowadzonych na terenie Puszczy Niepołomickiej (Socha, Orzeł 2011) opracowano lokalny, dynamiczny system krzywych bonitacyjnych. Badania te zostały rozszerzone w kolejnych latach na drzewostany pochodzące z południowej Polski (Socha, Orzeł 2013), a także na bonitację świerka pospolitego na siedliskach górskich (Socha 2011).

Prace nad ujęciem wzrostu wysokości lub bonitacji w ramy matematyczne prowadził Stępień (1979), który przy użyciu elektronicznych technik obliczeniowych wyznaczył współczynniki równania do obliczania bonitacji w zależności od wieku dla sosny, jodły, świerka, buka oraz dębu. Podobne badania prowadzili także Socha (1997) oraz Jarosz i Kłapeć (2002).

4. Statystyczne sposoby modelowania wskaźnika bonitacji

Analiza wskaźnika bonitacji była również prowadzona w pracach metodycznych, skupiających się na ocenie przydatności różnych metod statystycznych w modelowaniu wartości tej cechy. W pracy Subedi i Foxa (2016) sku-

piającej się nad wpływem cech glebowych na wskaźnik bonitacji sosny taeda *P. taeda* porównano użycie regresji wielokrotnej oraz regresji cząstkowych najmniejszych kwadratów. Wang i współpracownicy (2005) przebadali przy użyciu różnych technik statystycznych przestrzenną zależność wskaźnika bonitacji od czynników środowiska w Kanadzie. W ich przypadku najlepszą techniką, radzącą sobie również z nietypowymi wartościami danych, była technika uogólnionych modeli addytywnych (GAM). Do podobnych wniosków doszli badacze zajmujący się bonitacją w warunkach górskich w Turcji (Aertsen et al. 2010). W Czechach i na Słowacji użyto sieci neuronowych o predykcji wskaźnika bonitacji na podstawie danych klimatycznych dla świerka, buka i jodły (Hlásny et al. 2017). W badaniach z zachodnich Stanów Zjednoczonych (Latta et al. 2009) including biofuels supply, carbon sequestration, and projections of forest growth. Using PRISM (Parameter-elevation Regressions on Independent Slopes Model) użyto danych z wielkoobszarowej inwentaryzacji stanu lasu w celu modelowania wpływu zmiennych klimatycznych na potencjalną produktywność drzewostanów. Wang (2005) porównał cztery metody modelowania (regresję nieliniową, drzewo decyzyjne, uogólnione modele addytywne oraz sieci neuronowe) przestrzennej zmienności wskaźnika bonitacji sosny wydmowej *Pinus contorta* Dougl. ex Loud. na terenie borealnych borów mieszanych w Kanadzie. Badano również możliwość użycia teledetekcji do określania wskaźnika bonitacji dla sosny kalifornijskiej *P. radiata* w Nowej Zelandii (Watt et al. 2015). Dodatkowo, stworzono model określający produktywność w dwóch wariantach: przy posiadaniu danych o wieku i w wariancie zakładającym brak takich danych (Watt et al. 2016).

5. Przestrzenne ujęcie wskaźnika bonitacji

Mimo wielu przeprowadzonych dotychczas badań, wiedza o związku między czynnikami środowiskowymi a ich wpływem na wzrost drzew w ujęciu przestrzennym jest nadal niewielka. W badaniu nad topolą osikową *Populus tremuloides* Michx. (Chen et al. 2002) przeanalizowano wpływ środowiska na wskaźnik bonitacji w szerszym wymiarze przestrzennym, uzyskując 61% wyjaśnionej zmienności. Niektóre czynniki miały odmienny wpływ na badaną cechę w różnych strefach. To pokazuje, że wyniki mogą zmieniać się w zależności od skali przestrzennej w jakiej je się analizuje. W badaniach nad wskaźnikiem bonitacji daglezi zielonej *P. menziesii* porównano użycie regresji liniowej oraz regresji ważonej geograficznie (ang. Geographically-Weighted Regression) w centralnej części stanu Idaho w USA (Kimsey et al. 2008). Wykazano, że użycie metody przestrzennej pozwoliło wyjaśnić o 29% więcej zmienności we wskaźniku bonitacji oraz zmniejszyło błąd o ok. 53%. Do tej pory przeprowadzone bada-

nia nie potwierdziły jednoznacznie, że istnieje zależność bonitacji drzewostanów sosnowych od ich położenia geograficznego w Polsce. Badania te nie wyjaśniają również definitywnie, czy zależności zaobserwowane lokalnie znajdują odzwierciedlenie w skali całego kraju (Bruchwald et al. 2000a).

6. Analiza wpływu wieku na wskaźnik bonitacji

Problem większego niż spodziewany przyrostu drzew został poruszony w pracy Elfvinga i Tegnhammara (1996), w której wykazano że sposób zagospodarowania może mieć niebagatelny wpływ na wzrost drzew. Jednocześnie wiadomo, że wzrost na wysokość zostaje zahamowany przy pracach hodowlanych, tj. czyszczeniach i trzebieżach, co może zaburzać model bonitacyjny (Hynynen 1995). Badania prowadzone nad świerkiem w Niemczech i Austrii wykazały istotną statystycznie zmianę wzoru przyrostu wysokości drzewostanów powiązaną z wiekiem badanego obiektu (Schadauel 1996; Wenk, Vogel 1996). Podobne badania nad bukiem potwierdzają te same zależności (Untheim 1996). Jednocześnie badania z południowych Niemiec pokazują, że tablice zasobności używane dziś nie oddają dobrze dynamiki wzrostu drzew, najczęściej przeszacowując wyniki uzyskiwane empirycznie (Pretzsch 1996). Szeroko zakrojone badania nad dynamiką wzrostu drzewostanów świerkowych i bukowych w Europie od 1870 roku wykazują, że dalej podążają one za wcześniej wyznaczonymi trendami, aczkolwiek drzewostany gwałtowniej zwiększają swój przyrost (Pretzsch et al. 2014). Równocześnie wydłużenie okresu wegetacyjnego i wzrost temperatury przyspieszają procesy fizjologiczne (Crafts-Brandner, Salvucci 2004), szczególnie na żyzniejszych siedliskach. Badania nad wskaźnikiem bonitacji świerka zwyczajnego z Badenii-Wirtembergii (Yue et al. 2014) wykazały, że w połowie XX wieku zmienił się schemat przebiegu wzrostu badanego gatunku. Podobne badania na terenie Finlandii nad sosną zwyczajną, świerkiem pospolitym oraz modrzewiem wykazały różnicę w schemacie przebiegu wzrostu badanych gatunków w porównaniu do Europy Środkowej (Mäkinen et al. 2017). Pogłębione analizy dotyczące emisji azotu w rejonie badań dowiodły, że najprawdopodobniejszą przyczyną podwojenia się przyrostu drzew w ciągu ostatniego wieku był sposób zagospodarowania lasu.

7. Podsumowanie

Historia badań dotycząca bonitowania gatunków leśnych jest długa i sięga XVIII wieku. Wielu prekursorów tych badań słusznie uważało, że określenie jakości siedliska jest bardzo ważne z punktu widzenia racjonalnej gospodarki leśnej. Bonitacja drzew, jako miara potencjału siedliska, na

którym wzrasta las, stanowi jedną z najważniejszych charakterystyk drzewostanów gospodarczych. Bonitacja, w zależności od wybranego modelu, wyrażana jest najczęściej jako średnia wysokość drzew danego gatunku w określonym wieku (Bruchwald 1997, 1999; Sharma et al. 2002; Socha et al. 2017). Niemożliwe jest natomiast porównanie bonitacji między gatunkami ze względu na ekologię poszczególnych gatunków. Określenie bonitacji dla gatunku panującego w drzewostanie pozwala jednoznacznie scharakteryzować potencjał wzrostowy siedliska (Chen, Klinka 2000; Kliczkowska, Bruchwald 2000; Socha 2005). Modelowanie tego potencjału przeprowadza się najczęściej dla jednego gatunku drzewa. Podsumowując przegląd literatury dotyczący tego problemu należy stwierdzić, że dla podstawowego gatunku lasotwórczego w Polsce, tj. sosny, brak jest aktualnych opracowań obejmujących swym zakresem bonitację drzewostanów w skali kraju. Dotyczy to zarówno charakterystyki statystycznej, jak i wpływu czynników zewnętrznych oraz powiązania bonitacji z warunkami panującymi w układzie przestrzennym.

Konflikt interesów

Autorzy deklarują brak potencjalnych konfliktów.

Źródło finansowania badań

Badania zrealizowano w ramach grantów SGGW, numer: 505-10-032600-L00372-99, 505-10-032600-M00313-99 oraz 505-10-032600-Q00436-99.

Literatura

- Aertsen W., Kint V., van Orshoven J., Özkan K., Muys B. 2010. Comparison and ranking of different modelling techniques for prediction of site index in Mediterranean mountain forests. *Ecological Modelling* 221(8): 1119–1130. DOI 10.1016/j.ecolmodel.2010.01.007.
- Assmann E. 1955. Die Bedeutung des „erweiterten Eichhorn'schen Gesetzes“ für die Konstruktion von Fichten-Ertragstafeln. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 74(11–12): 321–330.
- Assmann E. 1959. Höhenbonität und wirkliche Ertragsleistung. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 78(1–2): 1–20.
- Assmann E. 1968. *Nauka o produktywności lasu*. PWRiL, Warszawa, 627 s.
- Avery T.E., Burkhart H.E., Bullock B.P. 2019. *Forest measurements*. Waveland Press, Long Grove, IL, 434 s.
- Baur F. 1881. *Die Rotbuche in Bezug auf Ertrag, Zuwachs und Form*. Verlag von Paul Parey, Berlin, 624 s.
- Beker C. 2007. Wysokość górna w drzewostanach sosnowych. *Sylvan* 3(3): 36–42. DOI 10.26202/sylvan.2006035.
- Beker C., Andrzejewski T. 2013. Model wzrostu niepielęgnowanych drzewostanów sosnowych II. Lokalny model bonitacyjny PINUS. *Acta Scientiarum Polonorum Silvarum Colendarum Ratio et Industria Lignaria* 12(3): 15–23.

- Bruchwald A. 1977. Change in top height of pine forest stands with age. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Biological Sciences* 5: 335–342.
- Bruchwald A. 1979. Zmiana z wiekiem wysokości górnej w drzewostanach sosnowych. *Sylwan* 2: 1–11.
- Bruchwald A., Dudek A., Michalak K., Rymer-Dudzinska T., Wróblewski 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 Instytutu Badawczego Leśnictwa* 838: 63–73.
- Bruchwald A., Kliczkowska A. 2000. Kształtowanie się bonitacji dla drzewostanów sosnowych Polski, w: *Przestrzenne zróżnicowanie wzrostu sosny*. A. Bruchwald, H. Jakubczyk (red.). Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa, 30–41. ISBN 83-7274-005-4.
- Bruchwald A., Michalak K., Wróblewski L., Zasada M. 2000.a. Analiza funkcji wzrostu wysokości dla różnych regionów Polski, w: *Przestrzenne zróżnicowanie wzrostu sosny*. A. Bruchwald, H. Jakubczyk (red.). Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa, 84–91. ISBN 83-7274-005-4.
- Bruchwald A., Michalak K., Wróblewski L., Zasada M. 2000.b. Wzrost wysokości sosny w różnych regionach Polski, w: *Przestrzenne zróżnicowanie wzrostu sosny*. A. Bruchwald, H. Jakubczyk (red.). Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa, 77–83. ISBN 83-7274-005-4.
- Burkhart H.E., Tennent R.B. 1977. Site index equations for radiata pine in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science* 7(3): 408–416.
- Cao Q.V., Baldwin V.C., Lohrey R.E. 1997. Site index curves for direct-seeded loblolly and longleaf pines in Louisiana. *Southern Journal of Applied Forestry* 21(3): 134–138. DOI 10.1093/sjaf/21.3.134.
- 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 10.1093/wjaf/15.2.62.
- Chen H.Y., Krestov P.V., Klinka K. 2002. Trembling aspen site index in relation to environmental measures of site quality at two spatial scales. *Canadian Journal of Forest Research* 32(1): 112–119. DOI 10.1139/x01-179.
- Cieszewski C.J., Zasada M. 2002. Dynamiczna forma anamorficznego modelu bonitacyjnego dla sosny pospolitej. *Sylwan* 146(7): 17–24.
- Cieszewski C.J., Zasada M. 2003.a. Model bonitacyjny dla sosny na podstawie tablic zasobności Szymkiewicza. *Sylwan* 147(1): 51–62. DOI 10.26202/sylwan.2003006.
- Cieszewski C.J., Zasada M. 2003.b. Wyprowadzanie ogólnych dynamicznych równań bonitacyjnych za pomocą uniwersalnej metody różnic algebraicznych. *Sylwan* 147(3): 40–46. DOI 10.26202/sylwan.2003027.
- Crafts-Brandner S.J., Salvucci M.E. 2004. Analyzing the impact of high temperature and CO₂ on net photosynthesis: Biochemical mechanisms, models and genomics. *Field Crops Research* 90(1): 75–85. DOI 10.1016/j.fcr.2004.07.006.
- Eichhorn F. 1902. Ertragstafeln für die Weißtanne (F. Eichhorn red.). Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 111 s. DOI 10.1007/978-3-662-41354-8.
- Elfving B., Kiviste A. 1997. Construction of site index equations for *Pinus sylvestris* L. using permanent plot data in Sweden. *Forest Ecology and Management* 98(2): 125–134. DOI 10.1016/S0378-1127(97)00077-7.
- Elfving B., Tegnhammar L. 1996. Trends of tree growth in Swedish forests 1953–1992: An analysis based on sample trees from the national forest inventory. *Scandinavian Journal of Forest Research* 11(1–4): 26–37. DOI 10.1080/02827589609382909.
- Gehrhardt E. 1909. Ueber Bestandes-Wachstumsgesetze und ihre Anwendung zur Aufstellung von Ertragstafeln. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 85: 117–128.
- Gehrhardt E. 1921. Eine neue Kiefern-Ertragstafel. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 97: 145–156.
- Gieruszyński T. 1959. Pomiar drzew i drzewostanów. PWRiL, Warszawa, 376 s.
- Hartig R. 1892. Ueber den Entwicklungsgang der Fichte im geschlossenen Bestände nach Höhe, Form und Inhalt. *Forst-Naturwiss Z*: 169–185.
- Heyer C. 1841. Die Waldertrags-Regelung. Verlag von B.C. Ferber, Giessen, 264 s.
- Heyer C. 1845. Wedenkinds Neue Jahrb. Climate Change: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge, 30, 1–127.
- Hlásny T., Trombik J., Bošľa M., Merganič J., Marušák R., Šebeň V., Štěpánek P., Kubišta J., Trnka M. 2017. Climatic drivers of forest productivity in Central Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 234–235: 258–273. DOI 10.1016/j.agrformet.2016.12.024.
- Hummel F.C., Christie J. 1953. Revised yield tables for conifers in Great Britain. Forestry Commission, London, 23 s.
- Hynynen J. 1995. Modelling tree growth for managed stands. *The Finnish Forest Research Institute Research Papers* 576.
- Jarosz K., Klapeć B. 2002. Modelowanie wzrostu drzewostanów z wykorzystaniem funkcji Gompertza. *Sylwan* 146(4): 35–42.
- Keller W. 1991. Określanie bonitacji na podstawie siedliska. *Sylwan* 135(7): 41–49.
- Kimsey M.J., Moore J., McDaniel P. 2008. A geographically weighted regression analysis of Douglas-fir site index in north central Idaho. *Forest Science* 54(3): 356–366. DOI 10.1093/forests/54.3.356.
- Kliczkowska A., Bruchwald A. 2000. Kształtowanie się bonitacji drzewostanów świerkowych na terenach górskich. *Sylwan* 144(9): 5–15.
- Kraft G. 1884. Beiträge zur lehre von den durchforstungen, schlagstellungen und lichtungshieben. Klindworth, Hannover, 147 s.
- Latta G., Temesgen H., Barrett T. M. 2009. Mapping and imputing potential productivity of Pacific Northwest forests using climate variables. *Canadian Journal of Forest Research* 39(6): 1197–1207. DOI 10.1139/X09-046.
- Magin R. 1957. Probleme bei der Aufstellung von Leistungstafeln für mehrschichtige Mischbestände, w: *Mitt. Stf. Bayern* 29: 176–185.
- Magin R. 1958. Über die Brauchbarkeit des forstlichen Bonitätsbegriffes. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 129: 145–150.
- Mäkinen H., Yue C., Kohnle U. 2017. Site index changes of Scots pine, Norway spruce and Larch stands in southern and central Finland. *Agricultural and Forest Meteorology* 237–238: 95–104. DOI 10.1016/j.agrformet.2017.01.017.

- Means J.E., Helm M.E. 1985. Height growth and site index curves for douglas-fir on dry sites in the Willamette National Forest. *USDA Forest Service Research Paper* 341: 17.
- Milner K.S. 1992. Site index and height growth curves for ponderosa pine, western larch, lodgepole pine, and Douglas-fir in western Montana. *Western Journal of Applied Forestry* 7(1): 9–14. DOI 10.1093/wjaf/7.1.9.
- Monserud R.A. 1984. Height growth and site index curves for inland douglas-fir based on stem analysis data and forest habitat type. *Forest Science* 30(4): 943–965. DOI 10.1093/forestscience/30.4.943.
- Nord-Larsen T. 2006. Developing dynamic site index curves for European Beech (*Fagus sylvatica* L.) in Denmark. *Forest Science* 52(2): 173–181. DOI 10.1093/forestscience/52.2.173.
- Ottelt K.C. 1764. Practischer Beweis, daß die Mathesis bey dem Forstwesen unentbehrliche Dienste thue. Joh. Andreas Schill, Arnstadt, 174 s.
- Philipp K. 1893. Hilfstabellen für Taxatoren. Müller, Karlsruhe, 32 s.
- Popham T.W., Feduccia D.P., Dell T.R., Mann W.F.J., Campbell T.E. 1979. Site index for loblolly plantations on cutover sites in the West Gulf Coastal Plain. *USDA Forest Service Research Note*, 250 s.
- Pretzsch H. 1996. Growth trends of forests in Southern Germany, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0_11.
- Pretzsch H., Biber P., Schütze G., Uhl E., Rötzer T. 2014. Forest stand growth dynamics in Central Europe have accelerated since 1870. *Nature Communications* 5(1): 4967. DOI 10.1038/ncomms5967.
- Schadauel K. 1996. Growth trends in Austria, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0_20.
- Schwappach A. 1943. Ertragstabellen der wichtigeren Holzarten. Merkur, Praga.
- Sewerniak P. 2008. Wstępne wyniki badań nad wpływem uziarnienia gleby na bonitację drzewostanów sosnowych w południowo-zachodniej Polsce. *Roczniki Gleboznawcze* 59(3): 256–262.
- Sewerniak P., Piernik A. 2012. Ujęcie wpływu właściwości gleb piaszczystych na bonitację drzewostanów sosnowych w południowo-zachodniej Polsce w modelach regresji. *Sylwan* 156(8): 563–571. DOI 10.26202/sylwan.2012043.
- Sharma M., Amateis R.L., Burkhart H.E. 2002. Top height definition and its effect on site index determination in thinned and unthinned loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management* 168(1–3): 163–175. DOI 10.1016/S0378-1127(01)00737-X.
- 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 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 10.1093/forestry/cpm041.
- Socha J. 1997. Matematyczne ujęcie bonitacji siedliska. *Sylwan* 2(141): 31–36.
- Socha J. 2005. Zależność pomiędzy wysokością górną a wysokością przeciętną w górskich drzewostanach świerkowych. *Sylwan* 149(8): 10–17. DOI 10.26202/sylwan.9200518.
- Socha J. 2011. Krzywe bonitacyjne świerka pospolitego na siedliskach górskich. *Sylwan* 155(12): 816–826. DOI 10.26202/sylwan.2011067.
- Socha J., Bruchwald A., Neroj B., Gruba P., Wertz B., Ochał W., Pierzchański M. 2017. 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., 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 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. *Sylwan* 159(8): 639–649. DOI 10.26202/sylwan.2015011.
- Socha J., Orzeł S. 2011. Dynamiczne krzywe bonitacyjne dla drzewostanów sosnowych Puszczy Niepołomickiej. *Sylwan* 155(5): 301–312. DOI 10.26202/sylwan.2010078.
- Socha J., Orzeł S. 2013. Dynamiczne krzywe bonitacyjne dla sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) z południowej Polski. *Sylwan* 157(1): 26–38. DOI 10.26202/sylwan.2012094.
- Stępień E. 1979. Bonitowanie jakości siedliska na podstawie funkcji bonitacji. *Zeszyty Naukowe SGGW – AR, Leśnictwo* 27: 77–87.
- Subedi S., Fox T.R. 2016. Predicting loblolly pine site index from soil properties using partial least-squares regression. *Forest Science* 62(4): 449–456. DOI 10.5849/forsci.15-127.
- Unthelm H. 1996. Has site productivity changed? A case study in the Eastern Swabian Alb, Germany, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0_12.
- Wang Y., Raulier F., Ung C.-H. 2005. Evaluation of spatial predictions of site index obtained by parametric and nonparametric methods – A case study of lodgepole pine productivity. *Forest Ecology and Management* 214(1–3): 201–211. DOI 10.1016/j.foreco.2005.04.025.
- Watt M.S., Dash J.P., Bhandari S., Watt P. 2015. Comparing parametric and non-parametric methods of predicting Site Index for radiata pine using combinations of data derived from environmental surfaces, satellite imagery and airborne laser scanning. *Forest Ecology and Management* 357: 1–9. DOI 10.1016/j.foreco.2015.08.001.
- Watt M.S., Dash J.P., Watt P., Bhandari S. 2016. Multi-sensor modelling of a forest productivity index for radiata pine plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science* 46(1): 9. DOI 10.1186/s40490-016-0065-z.
- Weck J. 1948. Forstliche Zuwachs-und Ertragskunde. Neumann Verlag, Radebeul, Berlin, 92 s.
- Wenk G., Vogel M. 1996. Height growth investigations of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in the Eastern Part of Germany during the last century, w: Growth trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN 978-35-40614-60-9. DOI 10.1007/978-3-642-61178-0_10.
- Wiedemann E. 1936. Die fichte. M. & H. Schaper, Hannover, 248 s.
- 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: 10.1016/j.foreco.2014.03.031.

Wkład autorów

W.K., R.T., T.B. – koncepcja pracy, W.K., R.T. – przegląd literatury, W.K. – napisanie pracy