

JANUSZ SZMYT

Hodowla lasu wobec zmian klimatycznych – wyzwania, ograniczenia, perspektywa

Silviculture and climate change – challenges, limitations and perspective

ABSTRACT

Szmyt J. 2020. Hodowla lasu wobec zmian klimatycznych – wyzwania, ograniczenia, perspektywa. Sylwan 164 (11): 881-895. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2020080>.

Changing environmental conditions that result from changes in the Earth's climate system have a multifaceted impact on both forest ecosystems and forestry. Taking into account the causes of the observed climate changes, they will also influence the silvicultural practices in order to realize the future goals of forest management. The significance of this impact is due to the fact that the growth and development of forests as well as its ability to resist the biotic and abiotic threats largely depends on silvicultural operations that are conducted in a given forest stand. The adopted silviculture procedures determine at the same time the achievement of the intended goals of modern multifunctional forest management. Throughout history, forestry and silviculture faced various challenges resulting from the changing environment, however, the currently observed variation in the environment has no equivalent in the past. Therefore, there is a need to recognize the threats to forest ecosystems resulting from these changes and to develop adaptive measures in relation to present and future forests so as to maintain their continuity of existence and ensure the sustainability of the forest use under the different scenarios of climate change. However, the uncertainty associated with both the pace and the magnitude of changes, as well as with the potential response of forest ecosystems to these changes, highlights the difficulties in developing an optimal strategy for adaptive management of forest ecosystems. To achieve the goals of multifunctional forestry in the future, the forest practitioners will have to take into account both a risk and an uncertainty in adaptive forest management. Despite the fact that there has been no single procedure elaborated so far, it is possible to indicate the principles of adaptive silviculture that allow achieving the objectives of forest management in the future. To some extent, these principles are implemented by the concept of close-to-nature silviculture.

KEY WORDS

adaptive management, climate change, close-to-nature silviculture, adaptive silviculture, novel silviculture

ADDRESSES

Janusz Szmyt – e-mail: janusz.szmyt@up.poznan.pl

Katedra Hodowli Lasu, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu; ul. Wojska Polskiego 71a, 60-625 Poznań

Wstęp

Podstawowym założeniem wielofunkcyjnej gospodarki leśnej jest zarządzanie zasobami leśnymi w sposób umożliwiający społeczeństwu czerpanie z nich korzyści – zarówno materialnych, jak i niematerialnych, obecnie i w przyszłości, bez negatywnego wpływu na inne ekosystemy [Ustawa... 1991]. Racjonalna gospodarka leśna oparta na wiedzy oraz na wieloletnim doświadczeniu kształ-

tuje wielofunkcyjność lasów [O'Hara 2016; Jandl i in. 2019]. Wielofunkcyjność współczesnej gospodarki leśnej w znacznym stopniu zapewnia hodowlą lasu, uwzględniająca w swoich działaniach procesy przyrodnicze zachodzące w każdym ekosystemie leśnym.

W przeszłości leśnicy permanentnie mierzyli się z nowymi wyzwaniami dotyczącymi dostosowania metod gospodarowania w lesie do zmieniających się warunków ekonomicznych, społecznych i ekologicznych. Do niedawna podczas realizowania tych zadań warunki środowiska uznawano za stosunkowo stałe [Graham i in. 1990; Millar i in. 2007; Seastedt i in. 2008; Puettmann i in. 2009; Puettmann 2011; Brang i in. 2014; Spathelf i in. 2014]. Takie podejście zdecydowanie ułatwiało planowanie hodowlano-gospodarcze.

Wynikające ze zmian klimatycznych przemiany w otaczającym środowisku są często określane jako bezprecedensowe zarówno pod względem tempa, jak i skutków w różnych aspektach życia człowieka, w tym także w odniesieniu do ekosystemów leśnych oraz gospodarki leśnej [Kowalski 1991; Brzeziecki 1994, 2007, 2008, 2014; Bernadzki 1995, 1997; Rykowski 2006; Bolte i in. 2009; Lindner i in. 2010, 2014; Chmura i in. 2011; Puettmann 2011; Hanewinkel i in. 2013; Reyer i in. 2014; Keenan 2015; Dyderski i in. 2018]. Zmiany w ekosystemach leśnych będą następować przede wszystkim na skutek wzrostu średniej temperatury, zmiany reżimu opadów atmosferycznych oraz występowania zjawisk o charakterze ekstremalnym [Bolte i in. 2009; Lindner i in. 2010, 2014; Jandl i in. 2019]. Przypisuje się im najczęściej charakter stresora, stąd też ich przewidywany wpływ na las będzie zazwyczaj negatywny, szczególnie w dłuższej perspektywie [Puettmann i in. 2009; Puettmann 2011; Hanewinkel i in. 2013; Dyderski i in. 2018], jakkolwiek pozytywny efekt również jest dostrzegany [Hättenschwiler i in. 1997; Bonan 2008; Kellomäki i in. 2008; Bolte i in. 2009; Chmura i in. 2011; Ford i in. 2017]. Wpływ zmian klimatycznych na ekosystem leśny jest wieloaspektowy. Przejawia się on zarówno na poziomie fizjologii drzew [Graham i in. 1990; Lindner i in. 2010, 2014; Sohn i in. 2013; Soudzilovskaia i in. 2013; Bussotti i in. 2015; Liang i in. 2016], wzajemnych zależności między gatunkami [Bernadzki 1995; Cavin i in. 2013; Szwagrzyk 2013; Zajączkowski i in. 2013; Keenan 2015; Alexander i in. 2016], zmian zasięgów i udziałów różnych gatunków drzew i krzewów leśnych [Szwagrzyk 2013; Park i in. 2014; Bolibok i in. 2016; Ford i in. 2017; Dyderski i in. 2018; Dmyterko i in. 2020], jak i zmian w produktywności i jakości drzewostanów [Kellomäki i in. 2008; Hanewinkel i in. 2013; Reyer i in. 2013; Fernández-de-Uña i in. 2015; Morin i in. 2018].

Współczesna hodowla lasu dysponuje wieloma narzędziami (działaniami) kształtującymi rozwój lasu w kierunku pożądanym z punktu widzenia realizacji celów gospodarki leśnej. W dotychczasowych założeniach opierała się ona na w miarę uporządkowanym i przewidywalnym rozwoju lasu [Puettmann i in. 2009]. Takie uproszczenie generowało pewne problemy związane przede wszystkim z realizacją pozaprodukcyjnych funkcji lasu, a także funkcji ekonomicznych [Jandl i in. 2019].

W kontekście przewidywanych zmian w środowisku na skutek zmian klimatycznych takie podejście w procesie decyzyjnym i w działaniach hodowlanych będzie tracić racjonalność. Leśnictwo, w szczególności wielofunkcyjne, będzie wymagało zmodyfikowanego podejścia do realizacji przyszłych potrzeb społeczeństwa w warunkach zmian klimatycznych i towarzyszącej im ogólnej niepewności [D'Amato i in. 2011; Schelhaas i in. 2015; Jandl i in. 2019]. Potrzeby społeczeństwa względem lasu będą raczej zbliżone do współczesnych, jednakże zapewnienie trwałości ich realizacji przez gospodarkę leśną będzie wymagało aktywnych działań nakierowanych przede wszystkim na adaptację lasów do nowych warunków otoczenia. Wielofunkcyjność lasu w ramach gospodarki leśnej w wielu krajach kreowana jest obecnie z dobrym skutkiem

poprzez działania hodowli lasu bliskiej naturze (close-to-nature silviculture) [Bernadzki 2000; Pommerening, Murphy 2004; Diaci 2006; Brzeziecki 2008; Bauhus i in. 2013; Spathelf i in. 2014; O'Hara 2016].

Ilość informacji na temat zmian klimatycznych i ich wpływu na ekosystemy leśne w ostatnich trzech dekadach wyraźnie wzrosła. Prowadzone badania nie wskazują jednoznacznie, jaki będzie charakter wpływu tych zmian na lasy i leśnictwo, stąd też istnieje potrzeba syntezy informacji w powiązaniu ze wskazaniem aktywnych działań hodowlanych nakierowanych na kształtowanie lasów o większych zdolnościach adaptacyjnych do nowych warunków środowiska.

W pracy omówiono strategię gospodarowania zasobami leśnymi w warunkach zmieniającego się środowiska na skutek zmian klimatycznych, zasady zarządzania adaptacyjnego w kontekście działań hodowlanych stymulujących adaptację lasów do nowego środowiska oraz wskazano rolę hodowli lasu bliskiej naturze w adaptacji współczesnych lasów do nowego otoczenia i przyszłe wyzwania i perspektywy stojące przed hodowlą lasu i leśnictwem.

Strategie w gospodarowaniu lasami wobec zmieniających się warunków środowiska

Gospodarowanie zasobami leśnymi w warunkach zmieniającego się klimatu i środowiska ma na celu zachowanie lub wzmoczenie funkcji lasów w nowych warunkach otoczenia. Niepewność co do kierunku i skali zmian w środowisku na skutek globalnych zmian klimatycznych sprawia, że zarządzanie zasobami leśnymi winno uwzględniać zasady zarządzania adaptacyjnego, z uwzględnieniem swego ryzyka wynikającego ze wspomnianych zmian [Bormann i in. 2007; Kellomäki i in. 2008; Bolte i in. 2009; Puettmann i in. 2009; Keenan 2015]. Zarządzanie winno mieć też charakter dynamiczny. Stałe monitorowanie wpływu podejmowanych decyzji i działań na ekosystem leśny ma zapewnić możliwość ich modyfikacji w zależności od sytuacji [Lawler 2009; Puettmann i in. 2009; Temperli i in. 2012; Keenan 2015]. Zarządzanie adaptacyjne w warunkach niepewności zmian środowiskowych w ekosystemach leśnych będzie z pewnością wymagało opracowania nowych działań lub modyfikacji już istniejących [Bolte i in. 2009; Puettmann i in. 2015]. Planowanie i prowadzenie wszelkich działań zmierzających do podniesienia odporności lasów, kształtowania ich elastyczności (rezyliencji) w warunkach możliwości wystąpienia zjawisk ekstremalnych oraz umożliwianie lasom reagowania na zaistniałe zmiany będzie podstawowym celem przyszłej hodowli lasu, a ryzyko stanie się nieodłącznym elementem planowania [Millar i in. 2007; Puettmann 2011].

Bolte i in. [2009] wyróżnili trzy ogólne strategie działań: utrzymanie aktualnej struktury lasu (strategia konserwatywna), aktywne działania adaptacyjne (strategia aktywna) oraz oparcie się w gospodarowaniu na naturalnych procesach adaptacyjnych (strategia pasywna). Załoženiami pierwszej strategii są: nieznaczny negatywny wpływ zmian klimatycznych na lasy, wysoka odporność współczesnych lasów na klimatyczne czynniki stresowe, wysoki wiek drzewostanów, istotność współczesnej struktury lasów i ich składów gatunkowych w spełnianiu celów gospodarki leśnej oraz wysokie prawdopodobieństwo, że obecne zabiegi hodowlane sprzyjają stabilności i żywotności drzewostanów. Strategia konserwatywna ma na celu utrzymanie bieżącej struktury lasów nawet w warunkach wzrastającego stresu klimatycznego i zakłada możliwość wystąpienia strat w zasobach leśnych. Kryteria przemawiające za strategią aktywną wynikają z założeń wskazujących na niewielką tolerancję współczesnych drzewostanów na stres klimatyczny, niewielką ich funkcjonalność oraz wysokie ryzyko zdarzeń ekstremalnych (pożary, huragany, gradacje). Strategia ta zakłada prowadzenie aktywnych działań m.in. w zakresie pielęgnacji lasów, skracanie cyklu produkcyjnych oraz wprowadzanie rodzimych i obcych gatunków w kształtowaniu

zróżnicowanego składu gatunkowego lasów. Wszelkie działania mają na celu zwiększenie zdolności adaptacyjnych współczesnych lasów do nowych warunków środowiskowych wynikających ze zmian klimatycznych. Trzecia strategia – pasywna – polega na zaniechaniu działań o charakterze strategii konserwatywnej i aktywnej. Jej ideą jest celowe wykorzystywanie naturalnych, spontanicznych procesów adaptacyjnych (naturalna sukcesja i migracja gatunków). Z jednej strony strategia ta ogranicza koszty związane z prowadzeniem aktywnych działań adaptacyjnych, z drugiej natomiast eliminuje możliwość kontrolowania dynamiki lasów wobec zmian klimatycznych. Kluczowe jest tutaj założenie dotyczące braku adekwatnych i sprawdzonych aktywnych działań adaptacyjnych w stosunku do ekosystemów leśnych w warunkach zmian klimatycznych.

W ramach ogólnych strategii adaptacyjnych można zaproponować szereg szczegółowych działań realizujących ogólny cel adaptacyjnego zarządzania zasobami leśnymi [Puettmann i in. 2009; Chmura i in. 2010; Brang i in. 2014; Keenan 2015; Gömöry i in. 2020; Vacek i in. 2020]. Równoległe z działaniami adaptacyjnymi należy podejmować działania o charakterze mitygacyjnym, np. zwiększające akumulację węgla czy też ograniczające emisję gazów cieplarnianych [Brzeziecki 2007; Keenan 2015]. Działania takie mają na celu zwiększenie powierzchni zalesień i odnowień oraz ograniczenie wylesień występujących na skutek stosowania zrębów zupełnych lub wielkopowierzchniowych zaburzeń naturalnych.

Zasady zarządzania adaptacyjnego w kontekście hodowli lasu

W warunkach zmieniającego się środowiska ogólny cel stojący przed gospodarką leśną, tj. dostarczanie możliwie wielu produktów i usług płynących z lasu przy zapewnieniu trwałości lasów, raczej nie ulegnie istotnej zmianie. Zmiany mogą natomiast dotyczyć sposobu realizacji niektórych działań zapewniających realizację celu w nowej rzeczywistości środowiskowej. Opracowanie takich procedur stanowi główne wyzwanie dla leśników w XXI wieku [Puettmann 2011; Brang i in. 2014]. Duża niepewność co do scenariuszy tych zmian oraz ich wpływu na ekosystemy leśne powoduje, że zarządzanie zasobami leśnymi będzie miało charakter zarządzania ryzykiem (risk management) czy niepewnością (uncertainty management) [Millar i in. 2007; Bolte i in. 2009; Puettmann i in. 2009; Brang i in. 2014]. Wspólnym mianownikiem działań gospodarczo-hodowlanych wydaje się być podejście do ekosystemu leśnego jako złożonego systemu adaptacyjnego (complex adaptive system) [Puettmann i in. 2009; Messier i in. 2015; Nagel i in. 2017]. Ekosystem leśny charakteryzuje się bowiem złożonymi i zróżnicowanymi pod względem charakteru powiązaniem, najczęściej nieliniowymi, między wszystkimi jego komponentami (roślinami, zwierzętami, ludźmi), przy czym zależności te występują na różnych poziomach i w różnych skalach czasowo-przestrzennych. Dzięki różnorodnym zależnościom, trudnym do przewidzenia w zmieniających się warunkach klimatu, system ten wykazuje dużą zdolność adaptacji do warunków otoczenia [Puettmann i in. 2009, 2015; Puettmann 2011; Messier i in. 2015]. Brang i in. [2014] wskazują 6 pól działań adaptacyjnych w ramach zarządzania ekosystemem leśnym.

ZWIĘKSZANIE RÓŻNORODNOŚCI BIOLOGICZNEJ DRZEWOSTANÓW. Zróżnicowanie biologiczne ekosystemu leśnego odgrywa istotną rolę w kształtowaniu jego odporności na działanie niekorzystnych czynników biotycznych i abiotycznych powiązanych ze zmianami klimatycznymi [Bernadzki 2000; Brzeziecki 2008, 2016; Brzeziecki i in. 2013; Szwaagrzyk 2103; Brang i in. 2014; Schelhaas i in. 2015; Dmyrko i in. 2020; Gömöry i in. 2020]. Zróżnicowanie drzewostanu pod względem składu gatunkowego sprzyja lepszemu adaptacji do niekorzystnych warunków środowiskowych w kontekście łagodzenia stresu wodnego czy wynikającego z występowania ekstremalnej temperatury oraz ogranicza ich podatność na inne zaburzenia, np. gradacje owadów. Większe różni-

cowanie gatunkowe drzewostanu koreluje z ich większą elastycznością rozumianą jako zdolność systemu do powrotu do stanu sprzed wystąpienia zaburzenia [Drever i in. 2006; Brzezicki 2008; Morin i in. 2018]. W zarządzaniu adaptacyjnym różnicowanie składów gatunkowych drzewostanów należy opierać zarówno na gatunkach (proweniencjach) rodzimych, jak i współcześnie obcych dla danego regionu. Gatunki współcześnie rodzime dla danego regionu dostosowane są bowiem do warunków środowiska ukształtowanego w innym niż przewidywany klimat [Seastedt i in. 2008; Woodall i in. 2010; Puettmann 2011; Brang i in. 2014; Park i in. 2014; Gömöry i in. 2020]. Nie ma gwarancji, że rodzime gatunki będą wykazywać adaptację do projektowanych warunków środowiska, ale nie ma też jasnych dowodów, że gatunki te nie poradzą sobie w nowej rzeczywistości [Szwagrzyk 2013; Park i in. 2014]. Obserwowane zamieranie czy też zmiany udziału gatunków w drzewostanach mogą prowadzić do zweryfikowania takiego podejścia [Bolte i in. 2009; Woodall i in. 2010; Puettmann 2011; Brang i in. 2014; Bussotti i in. 2015; Schelhaas i in. 2015; Dyderski i in. 2018; Gömöry i in. 2020]. Wykorzystanie gatunków obcych (budzące duże kontrowersje) musi zostać poprzedzone badaniami nad ich potencjalną zdolnością adaptacji do przewidywanych warunków na nowym obszarze, jak też nad potencjalnym skutkiem ich wprowadzenia w kontekście inwazyjności i konkurencyjności względem gatunków rodzimych [Bolte i in. 2009; Zajączkowski i in. 2013; Brang i in. 2014; Keenan 2015; Alexander i in. 2016]. Pytanie o to, które ze współcześnie obcych gatunków mogłyby być uwzględniane w przyszłym planowaniu gospodarczym, jest nadal otwarte. Mimo istniejących narzędzi, jakimi są modele zasięgów gatunków w zależności od warunków klimatycznych, należy mieć na uwadze, że ich wartość aplikacyjna w procesie decyzyjnym w ramach gospodarki leśnej jest nadal bardzo ograniczona [Aitken i in. 2008; Lindner i in. 2010; Park i in. 2014; Keenan 2015]. Można jedynie zakładać, że gatunki, które współcześnie rosną w klimacie cieplejszym i bardziej suchym niż panujący obecnie w Polsce, mogą stanowić potencjalne źródło, po które będzie można sięgnąć w przyszłości [Hanewinkel i in. 2013; Dyderski i in. 2018]. Z pewnością różnicowanie składu gatunkowego drzewostanów należy opierać na gatunkach o różnych cechach funkcjonalnych [Nock i in. 2016]. Wyższy potencjał adaptacyjny drzewostanów składających się z różniących się gatunków wynika z różnej efektywności wykorzystania zasobów życiowych. Skutkiem różnicowania składu gatunkowego drzewostanów może być ich mniejsza podatność na dłuższe okresy suszy, niekorzystną zmianę dostępności składników pokarmowych, wystąpienie pożaru czy gradacji itd. Takie podejście współgra z koncepcją tzw. bezpieczeństwa ekologicznego – głoszącą, że im bardziej zróżnicowany układ, tym lepiej radzi on sobie w nowych warunkach [Yachi, Loreau 1999; Chmura i in. 2010]. W praktyce realizację tej zasady można uzyskać, dostosowując różne sposoby cięć do właściwości biologicznych i ekologicznych poszczególnych gatunków. Dużą możliwością pod tym względem przedstawiają m.in. rębnie stopniowe. Pewne możliwości dają także zabiegi pielęgnacyjne, w ramach których promuje się gatunki domieszkowe już występujące w drzewostanie [Bernadzki 2000; Brang i in. 2014; Drozdowski 2018]. Realnym niebezpieczeństwem w realizowaniu zasady wzbogacania różnorodności gatunkowej drzewostanów może być obserwowana współcześnie nadmierna populacja dużych roślinożerców.

ZWIĘKSZANIE ZRÓŻNICOWANIA STRUKTURY I BUDOWY DRZEWOSTANÓW. Przyczyną uwzględnienia tej zasady jest fakt, że zróżnicowane pod względem budowy pionowej i poziomej drzewostany wykazują lepszą zdolność do adaptacji niż układy jednopiętrowe i jednowiekowe [Bernadzki 1995, 2000; Puettmann i in. 2009; Bausch i in. 2013; Brang i in. 2014]. Lepsza ich adaptacja wynika z mniejszej podatności na szkody wynikające z wystąpienia ekstremalnych zdarzeń (pożarów, wiatrów, okiści), których częstotliwość prawdopodobnie wzrośnie na skutek zmian klimatycznych. Szkody w drzewostanie wskutek huraganowych wiatrów rosną wraz ze średnią wysokością

drzewostanu [Bauhus i in. 2013], stąd też jednopiętrowe drzewostany są bardziej podatne na huraganowe wiatry niż drzewostany wielopiętrowe. Te ostatnie wykazują również większą zdolność do regeneracji po ustaniu zaburzenia, co wynika z występowania w nich drzew niższych, często niewykazujących istotnych uszkodzeń i pozytywnie reagujących na uwolnienie spod ocienienia drzew górnego piętra. Zróżnicowanie rozmiarów drzew wpływa także na mniejszą podatność drzewostanu na gradacje owadzie i szkody od oksiści. Prawdopodobieństwo wystąpienia istotnych szkód w całym ekosystemie leśnym wyraźnie zatem spada ze wzrostem zróżnicowania jego budowy, struktury i tekstury [O'Hara, Ramage 2013]. Działania realizujące zasadę kształtowania zróżnicowanych strukturalnie lasów mogą być związane zarówno z cięciami odnowieniowymi (rębnyimi), jak i pielęgnacyjnymi. Rębnie stopniowe i przerębnowe wydają się być szczególnie korzystne, gdyż prowadzą do wykształcenia zróżnicowanych wiekowo drzewostanów. Pozostawianie fragmentów starodrzewu na zrębach zupełnych także może być pomocne w realizacji tej zasady. Cięcia pielęgnacyjne realizujące omawianą zasadę winny mieć charakter trzebieży przekształceniowej, przerębnowej, a także górnej i selekcyjnej [Kacprzak 2007; Brzeziecki 2008; Sohn i in. 2013; Park i in. 2014; Vacek i in. 2020].

ZWIĘKSZANIE ZMIENNOŚCI GENETYCZNEJ. Zdolność adaptacyjna drzew i drzewostanów zależy w znacznym stopniu od ich zmienności genetycznej. Działania utrzymujące lub zwiększające tę zmienność wpisują się zatem w ramy adaptacyjnej hodowli lasu [Aitken i in. 2008; Chmura i in. 2010; Brang i in. 2014; Bussotti i in. 2015; Keenan 2015; Spathelf i in. 2015; Gömöry i in. 2020]. Realizacji tej zasady sprzyja promowanie odnowienia naturalnego oraz stosowanie długich okresów odnowienia podczas cięć odnowieniowych [Park i in. 2014; Fady i in. 2016]. Zwiększeniu zmienności genetycznej drzewostanu może też służyć selekcja prowadzona w ramach zabiegów pielęgnacyjnych w lesie. Współcześnie selekcja dokonywana jest względem cech produkcyjnych, z jednoczesnym uwzględnieniem żywotności drzew. Kryterium to jednak często prowadzi do zmniejszenia zdolności adaptacyjnej populacji [Brang i in. 2014]. W przypadku adaptacyjnej hodowli lasu należałoby kryteria selekcyjne zmienić w kierunku wspierania osobników wykazujących lepszą adaptację (cechy adaptacyjne) do zmieniającego się środowiska. Popieranie gatunków domieszkowych oraz pozostawianie części osobników podokapowych również sprzyja adaptacji drzewostanów do nowych warunków. Na możliwość zwiększenia zmienności genetycznej drzewostanów wskazują m.in. badania proveniencyjne, wyniki których należałoby w znacznie większym stopniu uwzględniać w zarządzaniu adaptacyjnym [Thomson, Parker 2008; Spathelf i in. 2015; Gömöry i in. 2020]. Istotny wkład w przyszłą praktykę leśną powinny stanowić badania nad rozpoznaniem genów odpowiedzialnych za zdolność adaptacyjną różnych gatunków drzew leśnych [González-Martínez i in. 2006; Park i in. 2014].

ZWIĘKSZANIE ODPORNOŚCI DRZEW I DRZEWOSTANU NA CZYNNIKI BIOTYCZNE I ABIOTYCZNE. Przewidywane zmiany klimatyczne będą skutkować większą częstotliwością zdarzeń o charakterze ekstremalnym i wielkopowierzchniowym, często o destrukcyjnym wpływie na ekosystem leśny [Seidl i in. 2017]. Ekstremalna temperatura, susze czy pożary mają znacznie większy wpływ na ekosystem leśny niż średnie parametry klimatyczne. Działania sprzyjające wzmacnianiu odporności pojedynczego drzewa, a więc i całego drzewostanu oraz ekosystemu, są realizowane przez leśników od bardzo dawna. Uwzględnia się w nich jednocześnie założenie, że odporność każdego drzewa na czynniki stresowe jest różna, podobnie jak zróżnicowana jest odporność gatunków. W przypadku pojedynczego drzewa jego większa żywotność świadczy najczęściej o większej odporności na niekorzystne czynniki abiotyczne i biotyczne [Puettmann 2011]. Wszelkie zatem postępowanie zwiększające żywotność pojedynczego osobnika – np. bardziej intensywne cięcia pielęgnacyjne czy mniejsze zagęszczenie początkowe upraw – sprzyjają podnoszeniu tej odpor-

ności. Większa przestrzeń życiowa drzew w przestrzeni nadziemnej skutkuje mniejszą konkurencją w przestrzeni podziemnej, co ma znaczenie dla rozwoju systemów korzeniowych. Lepszy rozwój korzeni może zwiększyć odporność drzew, np. na stres związany z niedostatkiem wilgoci [Sohn i in. 2013]. Stabilność poszczególnych komponentów przekłada się zatem na stabilność całego układu, a podatność na szkody poszczególnych elementów określa podatność całego układu. Zróżnicowany skład gatunkowy, zróżnicowana budowa, struktura i tekstura drzewostanu sprzyjają zatem wzmoczeniu stabilności (odporności) ekosystemu leśnego w kontekście nieprzewidywalnych do końca zmian klimatycznych.

PRZEBUDOWA ZAGROŻONYCH DRZEWOSTANÓW. Przebudowa drzewostanów realizowana jest przez leśników od wielu już dziesięcioleci. Przyczyną tych działań było i nadal jest stwierdzenie niezgodności składu gatunkowego drzewostanu z aktualnymi warunkami siedliskowymi, co przekłada się na niemożność realizacji założonego celu hodowlano-gospodarczego. Pozostałe wskaźniki przebudowy, np. spadek zdrowotności czy spadek produktywności, często wynikają z nieodpowiedniego składu gatunkowego względem warunków siedliskowych. Często potrzeba przebudowy drzewostanu wynika z wysokiego ryzyka utraty stabilności statycznej lub biologicznej przez cały ekosystem. W ramach działań adaptacyjnych w drzewostanach o wysokim ryzyku utraty stabilności zaleca się jeszcze przed osiągnięciem przez nie dojrzałości użytkowej podjęcie aktywnych działań, których celem ma być przemiana budowy i struktury drzewostanów w kierunku większego zróżnicowania. Zagrożenie współczesnych drzewostanów wynikające ze zmian klimatycznych będzie związane z większą częstotliwością ekstremalnych zjawisk pogodowych (susze, pożary, huragany), które mogą prowadzić do destrukcji podatnych na te czynniki drzewostanów [Brang i in. 2014]. W kontekście przewidywanych zmian środowiska należałoby szczególnie zwracać uwagę na współcześnie młode drzewostany o mało zróżnicowanej budowie i strukturze, a ich adaptację do nowych warunków prowadzić z uwzględnieniem np. trzebieży przekształceniowej, trzebieży grupowych itd. Godne rozważenia w realizacji tej zasady byłoby także skrócenie cykli produkcyjnych niektórych gatunków lasotwórczych oraz wprowadzanie na ich miejsce gatunków (proweniencji) zaadaptowanych do nowych warunków środowiska (w tym gatunków obcych) [Bauhus i in. 2013].

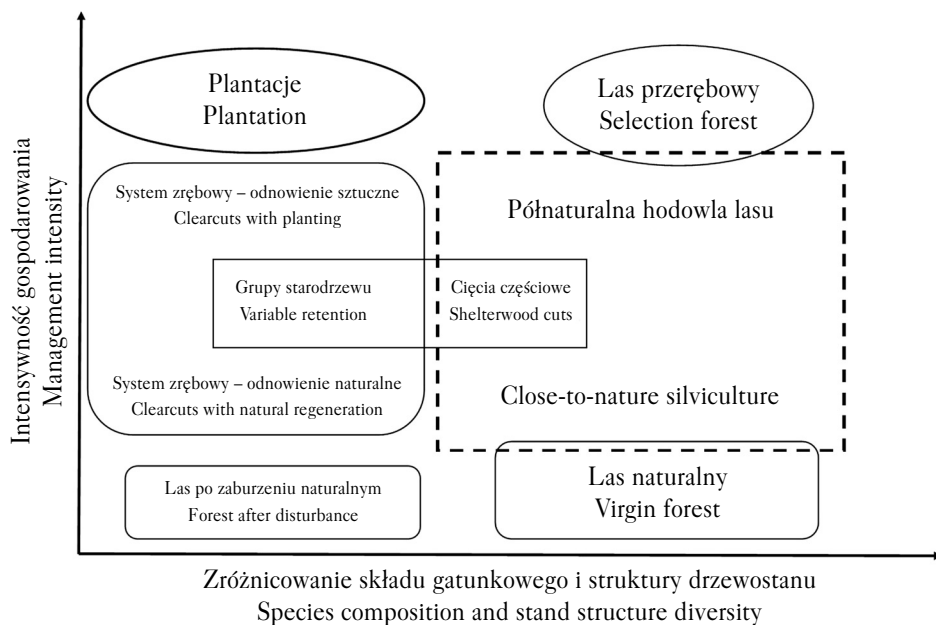
UTRZYMYWANIE WZGLĘDNIE NISKIEGO ZADRZEWIENIA I ZASOBNOŚCI DRZEWOSTANU. Zasada ta będzie wiązała się z potrzebą ograniczania strat ekonomicznych spowodowanych np. zjawiskami ekstremalnymi, co wydaje się racjonalnym gospodarczo podejściem. Wysoki czynnik zadrzewienia skorelowany jest często z większą podatnością lasu na uszkodzenia na skutek zaburzeń, np. ze strony silnych wiatrów i pożarów [Spiecker 2003; Brang i in. 2014]. Mniejsza dostępność wody przy jednocześnie wydłużających się okresach suszy, przeplatanych intensywnymi opadami, ma silniejszy negatywny wpływ w drzewostanach o wysokim zadrzewieniu. Z punktu widzenia efektywności gospodarowania zasobami wodnymi drzewostany o mniejszym zadrzewieniu (zasobności) wydają się być bardziej zaadaptowane do przyszłych warunków środowiskowych, o czym świadczą doświadczenia z południowej Europy [Puettmann 2011; Brang i in. 2014]. Realizację tej zasady można osiągnąć m.in. silniejszymi zabiegami pielęgnacyjnymi i co za tym idzie skróceniem cykli produkcyjnych różnych gatunków lasotwórczych (szybsza produkcja grubszych sortymentów).

Rola półnaturalnej hodowli lasu w zarządzaniu adaptacyjnym w warunkach zmian klimatycznych

Półnaturalna hodowla lasu (PHL) [Bernadzki 2000], utożsamiana z hodowlą lasu bliską naturze, jest koncepcją, w ramach której w procesie gospodarowania lasem zwraca się uwagę zarówno na

funkcje środowiskowo-społeczne (pozaprodukcyjne), jak i ekonomiczne, traktując je równoważnie [Brzeziecki 2008]. Jest sposobem zagospodarowania lasów (w szerokim pojęciu) w ramach wielofunkcyjnej gospodarki leśnej mającym zapewnić trwałość lasu jako formacji roślinnej i trwałość jego użytkowania w zmieniających się warunkach socjalno-ekonomicznych [Bauhus i in. 2013; Spathelf i in. 2015]. Jakkolwiek korzenie tej koncepcji sięgają XIX stulecia, to dopiero w latach 80. ubiegłego wieku zainteresowanie nią ponownie wzrosło na skutek obserwowanych niekorzystnych efektów (środowiskowych, przyrodniczych i ekonomicznych) gospodarowania systemem zrębowym [Pommerening, Murphy 2004; Brang i in. 2014; Spathelf i in. 2015]. Cele wielofunkcyjnej gospodarki leśnej mogą być realizowane drogą różnego postępowania hodowlanego z zakresu hodowli lasu bliskiej naturze, co można obserwować w różnych regionach świata [Diaci 2006; O'Hara, Ramage 2013; Brang i in. 2014; O'Hara 2014; Puettmann i in. 2015]. Wspólnym mianownikiem (celem) tych działań jest hodowla zróżnicowanych strukturalnie drzewostanów przy możliwie szerokim wykorzystaniu naturalnych procesów rozwojowych w lesie [Bernadzki 2000; Pommerening, Murphy 2004; Brzeziecki 2008; Puettmann i in. 2009; O'Hara, Ramage 2013; Brang i in. 2014; O'Hara 2014; Spathelf i in. 2015]. Potencjalne znaczenie PHL oraz jej rolę w adaptacyjnej gospodarce leśnej w warunkach zmieniającego się klimatu prezentuje rycina 1.

Działania PHL uwzględniają wykorzystanie naturalnych procesów przyrodniczych w lesie w celu uzyskania ich większej „naturalności”, która to cecha często jest postrzegana jako panaceum na niekorzystny efekt zmian klimatycznych w odniesieniu do ekosystemów leśnych. Jednakże naturalność nie powinna być celem samym w sobie w adaptacyjnym zarządzaniu zasobami leśnymi [Brzeziecki 2008; Bauhus i in. 2013; O'Hara 2016], lecz może być środkiem realizacji



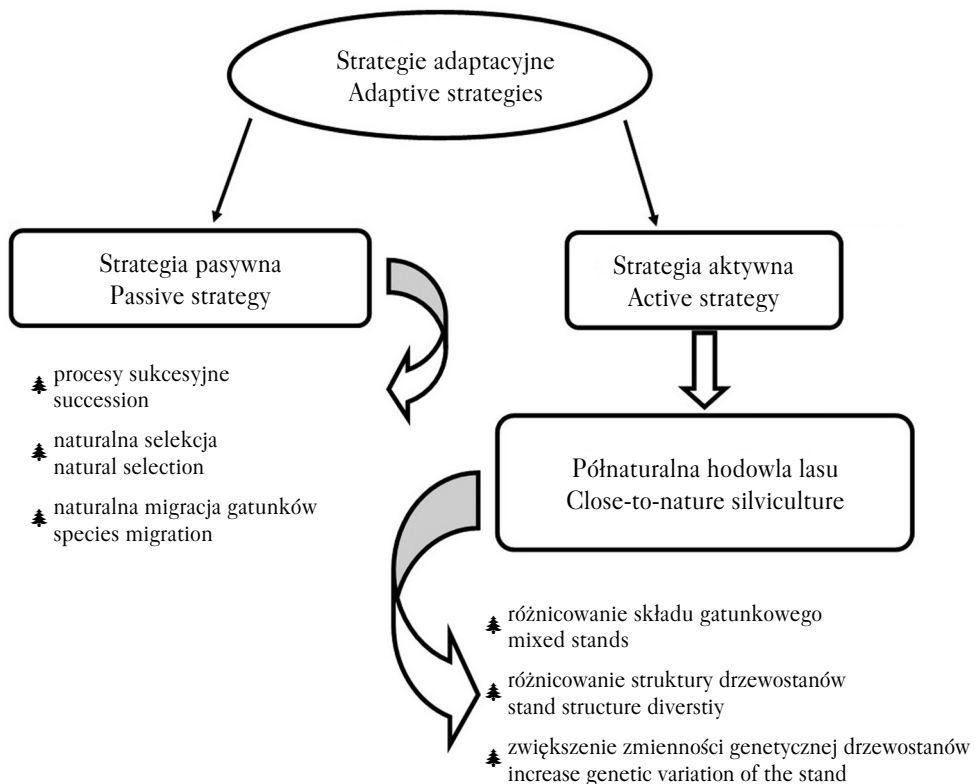
Ryc. 1.

Miejsce półnaturalnej hodowli lasu w różnych systemach zagospodarowania lasu w kontekście zmian klimatycznych [Puettmann i in. 2009, zmodyfikowane]

Close-to-nature silviculture within the frame of the other management systems in the face of climate change [Puettmann et al. 2009, modified]

celów wielofunkcyjnej gospodarki leśnej w zmieniającym się środowisku. W działaniach hodowlanych wyróżnia się dwa podejścia odpowiadające przeciwnym strategiom działań adaptacyjnych (ryc. 2). Strategia pasywna, zakładająca bardzo ograniczony wpływ człowieka na rozwój i adaptację lasów, będzie miała raczej ograniczoną rolę w przyszłym leśnictwie. Adaptacja lasów do zmieniających się warunków środowiska na skutek naturalnych sił przyrody może bowiem trwać setki lat, a efekt może być nadal obciążony dużym ryzykiem [Woodall i in. 2010; Park i in. 2014; Jandl i in. 2019; Gömöry i in. 2020]. Zmiany w środowisku zachodzą często szybciej, niż przebiega naturalna adaptacja ekosystemów. Nie będzie temu pomagać współczesna fragmentaryzacja kompleksów leśnych ani też silna presja na las ze strony zwierzyny leśnej. Jak wskazują badania, aktywne działania leśników w większym stopniu mogą przyczynić się do szybszej adaptacji ekosystemów [Puettmann 2011; Jandl i in. 2019].

Półnaturalna hodowla lasu może w znacznym stopniu przyczynić się zarówno do adaptacji współczesnych lasów do nowych warunków środowiska, jak i do łagodzenia wpływu zmian klimatycznych na ekosystem leśny. Zasadom zarządzania adaptacyjnego w stosunku do ekosystemów leśnych można bowiem przypisać różne pola zainteresowań w ramach PHL i w kontekście obu wskazać konkretne działania (tab.). Można dojść do wniosku, że często działania w ramach tej koncepcji sprzyjają zarządzaniu adaptacyjnemu w odniesieniu do ekosystemu leśnego (np. zapewnic-



Ryc. 2.

Strategie adaptacyjne i działania hodowlane w ramach półnaturalnej hodowli lasu w warunkach zmieniającego się środowiska

Adaptive strategies and silvicultural actions within the frame of close-to-nature silviculture in the face of environment changes

nie trwałości lasu, hodowla drzewostanów mieszanych, różnicowanie budowy i struktury drzewostanu itd.). Przykładowo: główny postulat półnaturalnej hodowli lasu wiąże się z utrzymaniem trwałości szaty leśnej poprzez ograniczenie lub wręcz zaniechanie stosowania zrębów zupełnych i ma jednocześnie charakter łączący negatywny wpływ zmian klimatycznych (sprzyjając tym samym akumulacji węgla w biomase i glebie leśnej) oraz charakter adaptacyjny [Rykowski 2006; Sedjo, Sohngen 2012]. Inny z kolei postulat PHL, tj. korzystanie z puli gatunków współcześnie rodzimych, może natomiast być nie dość wystarczający, by zapewnić trwałość lasów w przyszłych warunkach środowiska [Woodall i in. 2010; Puettmann 2011; Bauhus i in. 2013]. Stąd też opracowanie nowych wariantów składu gatunkowego zaadaptowanych do nowego otoczenia będzie głównym wyzwaniem przyszłej hodowli lasu. Niepewność przyszłych scenariuszy warunków klimatycznych już dzisiaj stanowi (i nadal będzie stanowił) główne źródło wysokiego ryzyka tych działań.

Przeszłość hodowli lasu i leśnictwa w warunkach zmian klimatycznych

Przewidywane zmiany klimatyczne mogą prowadzić do zmiany dotychczasowych systemów zagospodarowania lasu ze względu na konieczność realizacji innych niż dotychczas celów hodowlano-gospodarczych [Park i in. 2014]. Do tej pory w postępowaniu hodowlano-gospodarczym warunki środowiska traktowano jak czynnik podlegający niewielkim i nieistotnym z punktu widzenia gospodarki leśnej wahaniom. W obecnej rzeczywistości takie podejście traci jednak swoją racjonalność i w związku z tym konieczne jest opracowanie nowych założeń hodowlano-gospodarczych uwzględniających: 1) niepewność zmian w środowisku, 2) niepewność związaną z wpływem tych zmian na ekosystem leśny i na przyszłą gospodarkę leśną oraz 3) niepewność związaną z reakcją ekosystemów leśnych na zmiany. W założeniach tych powinno się także uwzględniać różne scenariusze zmian, o różnym wpływie na środowisko. Szczególnym wyzwaniem w prowadzeniu gospodarki leśnej w warunkach zmieniającego się klimatu będzie uwzględnianie naturalnych zaburzeń, jako czynnika w istotny sposób zmieniającego lasy pod względem ilościowym i jakościowym [O'Hara, Ramage 2013; Szwagrzyk 2013; O'Hara 2016; Seidl i in. 2017] oraz określającego ich dynamikę. Kolejnym wyzwaniem będzie uwzględnienie możliwości występowania w lasach nowych gatunków (roślin, owadów, grzybów), które mogą w istotny sposób zmieniać strukturę lasów i zwiększać lub zmniejszać ich podatność na pozostałe czynniki stresowe [Park i in. 2014]. Rozpoznanie cech funkcjonalnych gatunków drzew leśnych, zależności między nimi a czynnikami klimatycznym oraz nadanie priorytetu niektórym cechom stanowi kolejne trudne wyzwanie zarówno dla badaczy, jak i praktyków leśnych.

Wyzwania stojące przed hodowlą lasu i wynikające ze zmian klimatycznych będą miały wymiar ekologiczny (np. zmiana szaty roślinnej lasów), społeczny (zmiana oczekiwań społeczeństwa względem lasu) i ekonomiczny (zmiana produktywności i jakości drzewostanów) [Kellomäki i in. 2008; Lindner i in. 2010; Hanewinkel i in. 2013; Park i in. 2014].

Wszelkie wyzwania hodowlane dotyczą w obliczu zmian klimatycznych nie tylko praktyków (leśników), ale także naukowców zajmujących się badaniami ekosystemów leśnych [Puettmann 2011; Park i in. 2014]. W zależności od tempa, skali i kierunku zmian współczesne postępowanie hodowlane będzie wymagało mniejszych lub większych modyfikacji, tak aby zapewnić ciągłość ekosystemu leśnego oraz dóbr i usług świadczonych przez las społeczeństwu [Seastedt i in. 2008; Puettmann 2011; Nocentini i in. 2017; Jandl i in. 2019; Bowditch i in. 2020].

Warto mieć na uwadze, że obserwowane zmiany w systemie klimatycznym są o tyle bezprecedensowe (i na swój sposób groźne), że nie znajdują odzwierciedlenia w przeszłości. Stąd też

Tabela.

Zasady zarządzania adaptacyjnego w kontekście półnaturalnej hodowli lasu [Pommerening, Murphy 2004 za Brzeziecki 2008] i odpowiadające im aktywne działania hodowlane

Adaptive management principles (Zasady) in the context of close-to-nature silviculture (PHL; [Pommerening, Murphy 2004 after Brzeziecki 2008]) and the corresponding silvicultural activities (Działania)

Zasady	PHL	Działania
Zwiększanie bioróżnorodności lasów	kształtowanie dostosowanych do siedliska drzewostanów mieszanych, ochrona starych drzew, martwego drewna, zagrożonych gatunków	rębnie stopniowe i częściowe, odnowienie naturalne i sztuczne, pozostawianie przestojów i nasienników, ochrona gatunków domieszkowych w zabiegach pielęgnacyjnych, racjonalna gospodarka łowiecka
Increasing tree species diversity	mixed tree species suitable for the site conservation of old trees, dead woods, endangered species etc.	irregular and shelterwood cuttings, natural and artificial regeneration retention silviculture retention silviculture, conservation of admixture tree species, rationalization of wildlife management
Zwiększanie różnicowania budowy i struktury drzewostanu	kształtowanie zróżnicowanej budowy i struktury drzewostanów	rębnie złożone, wydłużanie okresu odnowienia gatunków, trzebieże selekcyjne, przekształceniowe i przerębnowe, podsadzenia, racjonalna gospodarka łowiecka
Increasing stand structural diversity	emphasis on vertical and horizontal structure	selection cuts, long regeneration periods selective thinnings, underplanting, rationalization of wildlife management
Utrzymanie i zwiększanie zmienności genetycznej	promowanie rodzimych gatunków (proweniencji)	odnowienie naturalne, wspomaganą migracją (odnowienie sztuczne), wydłużanie okresu odnowienia, pozostawianie nasienników, wprowadzanie odpowiednich proveniencji, korytarze ekologiczne
Maintaining and increasing genetic diversity	promotion of native tree species (provenances)	natural regeneration, assisted migration (artificial planting), long regeneration periods, tree retention, suitable provenance introduction, ecological corridors
Zwiększanie odporności drzew i drzewostanów	pojedyncze drzewo jest przedmiotem działań hodowlanych proekologiczna ochrona lasu i gospodarka łowiecka	zwiększenie intensywności zabiegów pielęgnacyjnych, skracanie cykli produkcyjnych, wprowadzanie nowoczesnych technologii w zabiegach trzebieżowych, racjonalna gospodarka łowiecka
Increasing the resistance of trees and stands	individual tree silviculture ecologically sensitive wildlife management	increase thinning intensity, reduced rotation length, ecological sensitive technology, rationalization of wildlife management
Przebudowa zagrożonych drzewostanów	dostosowanie składu gatunkowego do warunków siedliskowych	skracanie cykli produkcyjnych
Stand conversion and transformation	attention to site limitations	reduced production cycles

Tabela ciąg dalszy.

Zasady	PHL	Działania
Utrzymanie względnie niskiego zadrzewienia drzewostanów	–	intensywniejsze zabiegi trzebieżowe, skracanie cykli produkcyjnych, mniejsze zagęszczenie początkowe
Maintaining relatively low stocking		higher intensity of thinnings, lower initial density, reduced production cycles

przyszła gospodarka leśna może znaleźć się w sytuacji, w której będzie musiała opracować postępowanie hodowlano-gospodarcze dla nowych, nieznanych dotychczas (w ujęciu gospodarczym) ekosystemów leśnych (non-analog ecosystems, novel ecosystems) [Seastedt i in. 2008; Puettmann 2011]. Współcześnie nie ma opracowanej jednej strategii działania, której stosowanie gwarantowałoby trwałość współczesnych lasów i ich użytkowania w warunkach zmieniającego się klimatu. Wydaje się jednak, że aktywne działania leśników realizujące zasady rozproszenia i zmniejszania ryzyka hodowlanego (skądinąd doskonale im znane) nabiorą w przyszłości jeszcze większego znaczenia. Wówczas istnieje duże prawdopodobieństwo, że część współczesnych nam lasów przetrwa. Zachodzi jednak prawdopodobieństwo – trudne do oszacowania – że część lasów ulegnie istotnym zmianom lub wręcz całkowitej destrukcji [Puettman 2011].

Przyszłą gospodarkę leśną dostosowaną do zmieniającego się klimatu (Climate-Smart Forestry) można zdefiniować jako zrównoważone i adaptacyjne zarządzanie lasami w celu ich ochrony i zwiększenia ich potencjału w zakresie przystosowania się do zmian klimatu oraz łagodzenia ich skutków. Celem takiego zarządzania będzie utrzymanie trwałości lasu (ekosystemu leśnego) oraz trwałości jego funkcji (środowiskowych, społecznych, ekonomicznych) przy jednoczesnym minimalizowaniu wpływu zmian klimatycznych na dobrostan ludzi i przyrody [Bowditch i in. 2020].

Literatura

- Aitken S. N., Yeaman S., Holliday J. A., Wang T., McLane S. C. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary Applications* 1: 95-111. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1752-4571.2007.00013.x>.
- Alexander J. M., Diez J. M., Hart S. P., Levine J. M. 2016. When Climate Reshuffles Competitors: A Call for Experimental Macroecology. *Trends Ecol. Evol.* 31: 831-841. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.08.003>.
- Bauhus J., Puettmann K. J., Kuhne C. 2013. Managing forests as complex adaptive systems: Building resilience to the challenge of global change. DOI: <https://doi.org/10.4324/9780203122808>.
- Bernadzki E. 1995. Gospodarka leśna w obliczu zmian klimatu. *Sylwan* 139 (1): 19-32.
- Bernadzki E. 1997. Cele hodowli lasu wczoraj i dziś. *Sylwan* 141 (4): 23-31.
- Bernadzki E. 2000. Półnaturalna hodowla lasu. Biblioteczka Leśniczego 129. Wyd. Świat, Warszawa.
- Bolibok L., Dobrowolska D., Mionskowski M. 2016. Potencjalny zasięg klimatyczny jodły (*Abies alba* Mill.) w Polsce. *Sylwan* 160 (6): 519-528. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2016007>.
- Bolte A., Ammer C., Löf M., Madsen P., Nabuurs G. J., Schall P., Spathelf P., Rock J. 2009. Adaptive forest management in central Europe: Climate change impacts, strategies and integrative concept. *Scand. J. For. Res.* 24: 473-482. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827580903418224>.
- Bonan G. B. 2008. Forests and climate change: Forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science* 320 (5882): 1444-1449. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1155121>.
- Bormann B. T., Haynes R. W., Martin J. R. 2007. Adaptive Management of Forest Ecosystems: Did Some Rubber Hit the Road? *Bioscience* 57: 186-191. DOI: <https://doi.org/10.1641/b570213>.
- Bowditch E., Santopuoli G., Binder F., del Río M., La Porta N., Klůvankova T., Lesinski J., Motta R., Pach M., Panzacchi P., Pretzsch H., Temperli C., Tonon G., Smith M., Velikova V., Weatherall A., Tognetti R. 2020. What is Climate-Smart Forestry? A definition from a multinational collaborative process focused on mountain regions of Europe. *Ecosyst. Serv.* 43: 101113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101113>.

- Brang P., Spathelf P., Larsen J. B., Bauhus J., Bončina A., Chauvin C., Drössler L., García-Güemes C., Heiri C., Kerr G., Lexer M. J., Mason B., Mohren F., Mühlethaler U., Nocentini S., Svoboda M. 2014. Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change. *Forestry* 87: 492-503. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu018>.
- Brzeziecki B. 1994. Rola matematycznego modelowania w prognozowaniu wpływu potencjalnych zmian klimatu na ekosystemy leśne. *Sylvan* 138 (10): 5-21.
- Brzeziecki B. 2007. Zmiany klimatu, węgiel i lasy. *Postępy Techniki w Leśnictwie* 98: 21-29.
- Brzeziecki B. 2008. Podejście ekosystemowe i półnaturalna hodowla lasu (w kontekście zasady wielofunkcyjnej lasu). *Studia i Materiały CEPL* 19: 41-54.
- Brzeziecki B. 2014. Wpływ sposobów zagospodarowania (odnowienia, pielęgnacji, użytkowania) na bilans węgla w lasach, potencjał sekwestracji i gromadzenia węgla. W: Rykowski K. [red.]. *Lasy i drewno a zmiany klimatyczne: zagrożenia i szanse*. Sękocin Stary, IBL.
- Brzeziecki B. 2016. Podstawy kształtowania składu gatunkowego drzewostanów w lasach zagospodarowanych. W: Gil W. [red.]. *Zagrożenia lasu oraz jego funkcji – przyczyny, konsekwencje i szanse dla gospodarki leśnej*. VIII Sesja Zimowej Szkoły Leśnej przy Instytucie Badawczym Leśnictwa. Sękocin Stary. 15-17 marca 2016 r. 335-356.
- Brzeziecki B., Drozdowski S., Bielak K., Buraczyk W., Gawron L. 2013. Kształtowanie zróżnicowanej struktury drzewostanów w warunkach nizinnych. *Sylvan* 157 (8): 597-606. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2013051>.
- Bussotti F., Pollastrini M., Holland V., Brüggemann W. 2015. Functional traits and adaptive capacity of European forests to climate change. *Environ. Exp. Bot.* 111: 91-113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2014.11.006>.
- Cavin L., Mountford E. P., Peterken G. F., Jump A. S. 2013. Extreme drought alters competitive dominance within and between tree species in a mixed forest stand. *Funct. Ecol.* 27: 1424-1435. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12126>.
- Chmura D., Anderson P. D., Howe T., Harrington C. A., Halofsky J. E., Peterson D. L., Shaw D. C., Clair B. S. 2011. Forest responses to climate change in the northwestern United States: Ecophysiological foundations for adaptive management. *For. Ecol. Manage.* 261: 1121-1142.
- Chmura D., Howe G. T., Anderson P. D., Clair B. S. 2010. Przystosowanie drzew, lasów i leśnictwa do zmian klimatycznych. *Sylvan* 154 (9): 587-602. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2010033>.
- D'Amato A. W., Bradford J. B., Fraver S., Palik B. J. 2011. Forest management for mitigation and adaptation to climate change: Insights from long-term silviculture experiments. *For. Ecol. Manage.* 262: 803-816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2011.05.014>.
- Diaci J. 2006. Nature-based forestry in Central Europe. Alternatives to industrial forestry and strict preservation. University of Ljubljana, Ljubljana.
- Dmyterko E., Bruchwald A., Mionskowski M., Brzeziecki B. 2020. Model składu gatunkowego drzewostanu dla lasów w Sudetach z uwzględnieniem zmian klimatycznych. *Sylvan* 164 (6): 454-466. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2020067>.
- Drever C. R., Peterson G., Messier C., Bergeron E., Flannigan M. 2006. Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience? *Can. J. For. Res.* 36: 2285-2299. DOI: <https://doi.org/10.1139/X06-132>.
- Drozdowski S. 2018. *Rębnia stopniowa*. Biblioteczka Leśniczego 391. Wyd. Świat, Warszawa.
- Dyderski M. K., Paź S., Frelich L. E., Jagodziński A. M. 2018. How much does climate change threaten European forest tree species distributions? *Glob. Chang. Biol.* 24: 1150-1163. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.13925>.
- Fady B., Cottrell J., Ackzell L., Alía R., Muys B., Prada A., González-Martínez S. C. 2016. Forests and global change: what can genetics contribute to the major forest management and policy challenges of the twenty-first century? *Reg. Environ. Chang.* 16: 927-939. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0843-9>.
- Fernández-de-Uña L., Cañellas I., Gea-Izquierdo G. 2015. Stand competition determines how different tree species will cope with a warming climate. *PLoS One* 10. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122255>.
- Ford K. R., Breckheimer I. K., Franklin J. F., Freund J. A., Kroiss S. J., Larson A. J., Theobald E. J., HilleRisLambers J. 2017. Competition alters tree growth responses to climate at individual and stand scales. *Can. J. For. Res.* 47: 53-62. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2016-0188>.
- Gömöry D., Krajmerová D., Hrivnák M., Longauer R. 2020. Assisted migration vs. close-to-nature forestry: what are the prospects for tree populations under climate change? *Cent. Eur. For. J.* 66: 63-70. DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2020-0008>.
- González-Martínez S. C., Krutovsky K. V., Neale D. B. 2006. Forest-tree population genomics and adaptive evolution. *New Phytol.* 170: 227-238. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01686.x>.
- Graham R. L., Turner M. G., Dale V. H. 1990. How increasing CO₂ and climate change affect forests: at many spatial and temporal scales, there will be forest responses that will be affected by human activities. *Bioscience* 40: 575-587. DOI: <https://doi.org/10.2307/1311298>.
- Hanewinkel M., Cullmann D. A., Schelhaas M. J., Nabuurs G. J., Zimmermann N. E. 2013. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nat. Clim. Chang.* 3: 203-207. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate1687>.
- Hättenschwiler S., Miglietta F., Raschi A., Körner C. 1997. Thirty years of in situ tree growth under elevated CO₂: A model for future forest responses? *Glob. Chang. Biol.* 3: 463-471. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.1997.00105.x>.

- Jandl R., Spathelf P., Bolte A., Prescott C. E. 2019. Forest adaptation to climate change – is non-management an option? *Ann. For. Sci.* 76: 1-13. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0827-x>.
- Kacprzak P. 2007. Koncepcja cięć pielęgnacyjnych o charakterze przekształceniowym. Biblioteczka Leśniczego 248. Wyd. Świat, Warszawa.
- Kowalski M. 1991. Climate-a changing component of forest site. *Fol. Forest. Pol.* A 33: 25-34.
- Keenan R. J. 2015. Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. *Ann. For. Sci.* 72: 145-167. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-014-0446-5>.
- Kellomäki S., Peltola H., Nuutinen T., Korhonen K. T., Strandman H. 2008. Sensitivity of managed boreal forests in Finland to climate change, with implications for adaptive management. *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 363: 2341-2351. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.2204>.
- Lawler J. J. 2009. Climate change adaptation strategies for resource management and conservation planning. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1162: 79-98. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04147.x>.
- Liang J., Crowther T. W., Picard N., Wiser S., Zhou M., Alberti G., Schulze E. D., McGuire A. D., Bozzato F., Pretzsch H., De-Miguel S., Paquette A., Hérault B., Scherer-Lorenzen M., Barrett C. B., Glick H. B., Hengeveld G. M., Nabuurs G. J., Pfautsch S., Viana H., Vibrans A. C., Ammer C., Schall P., Verbyla D., Tehebakova N., Fischer M., Watson J. V., Chen H. Y. H., Lei X., Schelhaas M. J., Lu H., Gianelle D., Parfenova E. I., Salas C., Lee E., Lee B., Kim H. S., Bruelheide H., Coomes D. A., Piotta D., Sunderland T., Schmid B., Gourlet-Fleury S., Sonké B., Tavani R., Zhu J., Brandl S., Vayreda J., Kitahara F., Searle E. B., Neldner V. J., Ngugi M. R., Baraloto C., Frizzera L., Bałazy R., Oleksyn J., Zawila-Niedzwiecki T., Bouriaud O., Bussotti F., Finér L., Jaroszewicz B., Jucker T., Valladares F., Jagodzinski A. M., Peri P. L., Gonmadje C., Marthy W., O'Brien T., Martin E. H., Marshall A. R., Rovero F., Bitariho R., Niklaus P. A., Alvarez-Loayza P., Chamuya N., Valencia R., Mortier F., Wortel V., Engone-Obiang N. L., Ferreira L. V., Odeke D. E., Vasquez R. M., Lewis S. L., Reich P. B. 2016. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forests. *Science* 354 (6309). DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1231237>.
- 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., Poulter 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? *J. Environ. Manage.* 146: 69-83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.030>.
- Lindner M., Maroschek M., Netherer S., Kremer A., Barbati A., Garcia-Gonzalo J., Seidl R., Delzon S., Corona P., Kolström M., Lexer M. J., Marchetti M. 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manage.* 259: 698-709. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>.
- Messier C., Puettmann K., Chazdon R., Andersson K. P., Angers V. A., Brotons L., Filotas E., Tittler R., Parrott L., Levin S. A. 2015. From Management to Stewardship: Viewing Forests As Complex Adaptive Systems in an Uncertain World. *Conserv. Lett.* 8: 368-377. DOI: <https://doi.org/10.1111/conl.12156>.
- Millar C. I., Stephenson N. L., Stephens S. L. 2007. Climate change and forests of the future: Managing in the face of uncertainty. *Ecol. Appl.* 17: 2145-2151. DOI: <https://doi.org/10.1890/06-1715.1>.
- Morin X., Fahse L., Jactel H., Scherer-Lorenzen M., García-Valdés R., Bugmann H. 2018. Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Sci. Rep.* 8: 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-23763-y>.
- Nagel L. M., Palik B. J., Battaglia M. A., D'Amato A. W., Guldin J. M., Swanston C. W., Janowiak M. K., Powers M. P., Joyce L. A., Millar C. I., Peterson D. L., Ganio L. M., Kirschbaum C., Roske M. R. 2017. Adaptive Silviculture for Climate Change: A National Experiment in Manager-Scientist Partnerships to Apply an Adaptation Framework. *J. For.* 115: 167-178. DOI: <https://doi.org/10.5849/jof.16-039>.
- Nocentini S., Buttoud G., Ciancio O., Corona P. 2017. Managing forests in a changing world: The need for a systemic approach. A review. *For. Syst.* 26: 1-15. DOI: <https://doi.org/10.5424/fs/2017261-09443>.
- Nock C. A., Vogt R. J., Beisner B. E. 2016. Functional Traits. *eLS* 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0026282>.
- O'Hara K. 2014. Multiaged silviculture. Managing for complex forest stand structures. Oxford University Press, Oxford, United Kingdom.
- O'Hara K. L. 2016. What is close-to-nature silviculture in a changing world? *Forestry* 89: 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpv043>.
- O'Hara K. L., Ramage B. S. 2013. Silviculture in an uncertain world: Utilizing multi-aged management systems to integrate disturbance. *Forestry* 86: 401-410. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt012>.
- Park A., Puettmann K., Wilson E., Messier C., Kames S., Dhar A. 2014. Can Boreal and Temperate Forest Management be Adapted to the Uncertainties of 21st Century Climate Change? *CRC. Crit. Rev. Plant Sci.* 33: 251-285. DOI: <https://doi.org/10.1080/07352689.2014.858956>.
- Pommerening A., Murphy S. T. 2004. A review of the history, definitions and methods of continuous cover forestry with special attention to afforestation and restocking. *Forestry* 77: 27-44. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/77.1.27>.

- Puettmann K., Coates K. D., Messier C. 2009. A critique of silviculture. Managing for complexity. Island Press, Washington – Covelo – London.
- Puettmann K. J. 2011. Silvicultural challenges and options in the context of global change: 'simple' fixes and opportunities for new management approaches. *J. For.* 31: 855-856. DOI: <https://doi.org/10.3928/01477447-20080901-33>.
- Puettmann K. J., Wilson S. M. G., Baker S. C. 2015. Silvicultural alternatives to conventional even-aged forest management – What limits global adoption? *For. Ecosyst.* 2: 8. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40663-015-0031-x>.
- Reyer C., Lasch-Born P., Suckow F., Gutsch M., Murawski A., Pilz T. 2014. Projections of regional changes in forest net primary productivity for different tree species in Europe driven by climate change and carbon dioxide. *Ann. For. Sci.* 71: 211-225. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0306-8>.
- Reyer C., Leuzinger S., Rammig A., Wolf A. 2013. A plant's perspective of extremes: Terrestrial plant responses to changing climatic variability. *Glob. Chang. Biol.* 19: 75-89. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.12023>.
- Rykowski K. 2006. O wpływie zmian klimatycznych na lasy i leśnictwo. Biblioteczka Leśniczego 244. Wyd. Świat, Warszawa.
- Schelhaas M. J., Nabuurs G. J., Hengeveld G., Reyser C., Hanewinkel M., Zimmermann N. E., Cullmann D. 2015. Alternative forest management strategies to account for climate change-induced productivity and species suitability changes in Europe. *Reg. Environ. Chang.* 15: 1581-1594. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0788-z>.
- Seastedt T. R., Hobbs R. J., Suding K. N. 2008. Management of novel ecosystems: Are novel approaches required? *Front. Ecol. Environ.* 6: 547-553. DOI: <https://doi.org/10.1890/070046>.
- Sedjo R., Sohngen B. 2012. Carbon sequestration in forests and soils. *Annu. Rev. Resour. Econ.* 4: 127-153.
- Seidl R., Thom D., Kautz M., Martin-Benito D., Peltoniemi M., Vacchiano G., Wild J., Ascoli D., Petr M., Honkaniemi J., Lexer M. J., Trotsiuk V., Mairota P., Svoboda M., Fabrika M., Nagel T. A., O Reyser C. P. 2017. Forest disturbances under climate change. *Nat. Clim. Chang.* 7: 395-402. DOI: <https://doi.org/10.1038/nclimate3303>.
- Sohn J. A., Gebhardt T., Ammer C., Bauhus J., Häberle K. H., Matyssek R., Grams T. E. E. 2013. Mitigation of drought by thinning: Short-term and long-term effects on growth and physiological performance of Norway spruce (*Picea abies*). *For. Ecol. Manage.* 308: 188-197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.048>.
- Soudzilovskaia N. A., Elumeeva T. G., Onipchenko V. G., Shidakov I. I., Salpagarova F. S., Khubiev A. B., Tekeev D. K., Cornelissen J. H. C. 2013. Functional traits predict relationship between plant abundance dynamic and long-term climate warming. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 110: 18180-18184. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1310700110>.
- Spathelf P., Bolte A., van der Maaten E. 2015. Is close-to-nature silviculture (CNS) an adequate concept to adapt forests to climate change? *Appl. Agric. Forestry Res.* 65: 161-170.
- Spathelf P., van der Maaten E., van der Maaten-Theunissen M., Campioli M., Dobrowolska D. 2014. Climate change impacts in European forests: The expert views of local observers. *Ann. For. Sci.* 71: 131-137. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0280-1>.
- Spiecker H. 2003. Silvicultural management in maintaining biodiversity and resistance of forests in Europe – Temperate zone. *J. Environ. Manage.* 67: 55-65. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(02\)00188-3](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)00188-3).
- Szwagrzyk J. 2013. Prawdopodobne zmiany zasięgów występowania gatunków drzewiastych – konsekwencje dla hodowli lasu. W: Rykowski K. [red.]. Lasy i drewno a zmiany klimatyczne: zagrożenia i szanse. Sękocin Stary, IBL.
- Temperli C., Bugmann H., Elkin C. 2012. Adaptive management for competing forest goods and services under climate change. *Ecol. Appl.* 22: 2065-2077. DOI: <https://doi.org/10.1890/12-0210.1>.
- Thomson A. M., Parker W. H. 2008. Boreal forest provenance tests used to predict optimal growth and response to climate change. 1. Jack pine. *Can. J. For. Res.* 38: 157-170.
- Ustawa z dnia 28 września 1991 r. o lasach. 1991. Dz. U. Nr 101, poz. 444.
- Vacek Z., Prokůpková A., Vacek S., Cukor J., Bílek L., Gallo J., Bulušek D. 2020. Silviculture as a tool to support stability and diversity of forests under climate change?: study from Krkonoše Mountains. *Cent. Eur. For. J.* 66: 116-129. DOI: <https://doi.org/10.2478/forj-2020-0009>.
- Woodall C. W., Oswalt C. M., Westfall J. A., Perry C. H., Nelson M. D., Finley A. O. 2010. Selecting tree species for testing climate change migration hypotheses using forest inventory data. *For. Ecol. Manage.* 259: 778-785. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.07.022>.
- Yachi S., Loreau M. 1999. Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96: 1463-1468. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.96.4.1463>.
- Zajączkowski J., Brzeziecki B., Perzanowski K., Kozak I. 2013. Wpływ potencjalnych zmian klimatycznych na zdolność konkurencyjną głównych gatunków drzew w Polsce. *Sylwan* 157 (4): 253-261. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2012134>.