SYLWAN 154 (9): 587-602, 2010

DANIEL J. CHMURA, GLENN T. HOWE, PAUL D. ANDERSON, J. BRADLEY ST.CLAIR

Przystosowanie drzew, lasów i leśnictwa do zmian klimatycznych

Adaptation of trees, forests and forestry to climate change

ABSTRACT

Chmura D. J., Howe G. T., Anderson P. D., St.Clair J. B. 2010. Przystosowanie drzew, lasów i leśnictwa do zmian klimatycznych. Sylwan 154 (9): 587-602.

Ongoing climate change will likely expose trees and forests to new stresses and disturbances during this century. Trees naturally adapt to changes in climate, but their natural adaptive ability may be compromised by the rapid changes projected for this century. In the broad sense, adaptation to climate change also includes the purposeful adaptation of human systems, which includes forestry. In this article, we briefly review the expected impacts of projected climate change on trees and forest ecosystems in Poland. We further provide a framework for designing adaptive strategies to sustain or enhance forest growth, health, and ecosystem services in new climates. Within this framework, we distinguish two related objectives: (1) adaptation of decision-making process in forest management and (2) adaptation of forest ecosystems. Each of these objectives may be achieved through strategies and options whose applicability is discussed in relation to major forest functions – ecological and societal, commercial, and multiple-use. Knowledge gaps and research needs are also identified. We conclude that the recent emphasis on sustainable multi-functional forestry and the current ownership structure in Poland will facilitate adaptation of Polish forests to future climates. However, much remains to be learned about the impacts of climate change, especially at the ecosystem level. Cooperation between researchers and forest managers is critical for developing better management strategies for adapting forests to climate change.

KEY WORDS

adaptation strategy; management; resistance; resilience; sustainable forestry

ADDRESSES

Daniel J. Chmura[1, 2] – e-mail: djchmura@poczta.onet.pl
Glenn T. Howe[2]
Paul D. Anderson[3]
J. Bradley St.Clair[3]

[1] Instytut Dendrologii PAN; ul. Parkowa 5; 62-035 Kórnik,

[2] Department of Forest Ecosystems and Society, Oregon State University; 321 Richardson Hall, Corvallis, OR 97331, USA

[3] Pacific Northwest Research Station, USDA Forest Service; 3200 Jefferson Way, Corvallis, OR 97331, USA

Wstęp

Uważa się, że szybko postępujące w ostatnich dziesięcioleciach zmiany klimatyczne są w dużej mierze wynikiem działalności człowieka [Oreskes 2005; Oppenheimer i in. 2007]. Zmiany w składzie atmosfery, szczególnie koncentracji dwutlenku węgla (CO_2), są główną siłą napędową zmian klimatycznych [Summary... 2007], które z dużym prawdopodobieństwem będą nadal postępowały w ciągu tego wieku.

Lasy ze swej natury są narażone na wpływy zmiennego klimatu. Leśnictwo jest więc pod tym względem jednym z bardziej wrażliwych sektorów gospodarki. Zmieniające się warunki

środowiskowe będą narażać lasy na nowe abiotyczne i biotyczne zagrożenia. Z punktu widzenia zapobiegania skutkom zmian klimatu, lasy mają szczególną rolę do odegrania, wiążąc atmosferyczny węgiel (C) w biomasie i glebie, przeciwdziałając tym samym wzrostowi stężenia CO_2 w atmosferze. Jednak wypełnianie przez nie tych, jak też innych – ekologicznych, społecznych i gospodarczych funkcji określonych w Polityce Leśnej Państwa (PLP) [1997], zależne jest od utrzymania zdrowych, produktywnych i dostosowanych do siedliska ekosystemów leśnych.

W światowej literaturze dotyczącej zmian klimatycznych wiele artykułów przeglądowych podnosi problem potencjalnego wpływu zmieniającego się klimatu na drzewa i ekosystemy leśne [np. Saxe i in. 1998, 2001; Norby i in. 1999; Aber i in. 2001; Mohan i in. 2009]. Również wiele przeglądów dotyczy możliwości przystosowawczych zarówno z ewolucyjnego i biologicznego (przyrodniczego) punktu widzenia [np. Aitken i in. 2008], jak też ze strony procesu decyzyjnego i zarządzania w leśnictwie oraz pokrewnych dziedzinach [Halpin 1997; Noss 2001; Ohlson i in. 2005; Spittlehouse 2005]. Znacznie mniej pozycji traktujących o problemach zmian klimatycznych w lasach i leśnictwie jest dostępnych w literaturze krajowej [Kowalski 1994; Bernadzki 1995; Ryszkowski i in. 1995; Fabijanowski, Jaworski 1996; Sadowski 1996]. Potrzeba zaprezentowania szerszemu gronu polskich leśników złożoności problematyki dotyczącej zmian klimatu, ich wpływu na ekosystemy leśne i gospodarkę leśną wydaje się więc uzasadniona.

Celem artykułu jest przedstawienie możliwości przystosowawczych polskich lasów do spodziewanych zmian klimatu w świetle wielu strategii i opcji adaptacyjnych proponowanych w literaturze wraz z prezentacją potencjalnych korzyści, braków i potrzeb badawczych. Ze względu na ograniczenie objętościowe i ogromny zakres podjętej tematyki, artykuł ten nie jest i nie może być wyczerpującym przeglądem literatury prezentującym wszystkie wymiary dyskutowanego problemu. Strategie i opcje adaptacyjne zostaną przedstawione w sposób ramowy jako przyczynek do szerszej dyskusji na temat możliwości przystosowawczych polskich lasów.

Scenariusze zmian klimatu

Pomimo wielu niedoskonałości i niepewności związanych z długoterminowymi scenariuszami klimatycznymi, można nakreślić trend, jaki z dużym prawdopodobieństwem wykazywać będzie klimat w najbliższym stuleciu. Prognozowanie z pomocą zaawansowanych modeli klimatycznych wskazuje na średni wzrost temperatury o 1,1-4,0°C w skali globalnej pod koniec tego wieku w stosunku do średniej z lat 1980-1999 [Meehl i in. 2007]. Według scenariusza A1B, który reprezentuje pośrednie wartości pośród scenariuszy emisji gazów cieplarnianych [Nakicenovic, Swarts 2000], prognozowane ocieplenie w Polsce pod koniec wieku wahać się będzie od 3-3,5°C latem do 3,5-4°C zimą [Christensen i in. 2007].

Scenariusze dotyczące opadów są z reguły mniej zgodne i precyzyjne od spodziewanych zmian temperatury. Dla obszaru Polski prognozuje się raczej niewielkie zmiany w opadach pod koniec wieku [Impacts... 2008]. W porównaniu do średniej z lat 1980-1999, możliwy jest wzrost do 10% w skali rocznej pod koniec wieku, z zaznaczającymi się różnicami sezonowymi i regionalnymi – latem od 5% wzrostu opadów na północy kraju do 5% spadku na południu i od 10 do 15% wzrost opadów zimowych na całym obszarze Polski [Christensen i in. 2007]. Długość zalegania pokrywy śnieżnej prawdopodobnie zmniejszy się prawie do zera na nizinnym obszarze kraju [Impacts... 2008], powodując, że pod koniec wieku większość opadów zimowych będzie występowała pod postacią deszczu, zwiększając spływ powierzchniowy i zmieniając stosunki wodne w glebie. Nawet przy braku zmian w opadach, prognozowany wzrost temperatury powietrza może pociągnąć za sobą zwiększoną ewapotranspirację [Hobbins i in. 2008] i przyczynić się do częstszych lub bardziej intensywnych okresów suszy. Ocieplenie prawdopodobnie wzmocni

też cały cykl obiegu wody tak, że opady mogą stać się intensywniejsze [Summary... 2007], prowadząc do powodzi, szczególnie zimą i wiosną. Należy pamiętać o tym, że czynniki, jakie obecnie wpływają na wzrost, produkcyjność, śmiertelność i reprodukcję w biocenozach leśnych, będą określały zdolności przystosowawcze lasów w najbliższych dziesięcioleciach. Wpływ zmian klimatycznych musi być rozpatrywany w odniesieniu do tych czynników regulujących oraz do obecnej struktury wiekowej, gatunkowej i przestrzennej biocenoz leśnych.

Spodziewane konsekwencje zmian klimatycznych dla drzew i biocenoz leśnych

Wyższa temperatura powietrza, zmiany stosunków wodnych oraz zwiększająca się koncentracja CO_2 w atmosferze będą wywierały bezpośredni lub pośredni wpływ na drzewa i biocenozy leśne. Atmosferyczne stężenie CO_2 wpływa głównie na wymianę gazową roślin, podczas gdy temperatura reguluje zarówno tempo reakcji biochemicznych, jak też procesy rozwojowe drzew [Norby, Luo 2004]. Wydajność fotosyntezy w roślinach typu C_3 (wszystkie nasze rodzime rośliny drzewiaste) wzrasta wraz ze wzrostem koncentracji CO_2 poprzez ograniczenie fotorespiracji – alternatywnego wiązania tlenu przez enzym Rubisco odpowiedzialny za asymilację CO_2 [Drake i in. 1997; Saxe i in. 1998; Norby i in. 1999]. Niezliczone źródła wskazują, że tempo fotosyntezy wzrasta wraz ze zwiększoną koncentracją CO_2 [np. Curtis, Wang 1998; Ainsworth, Long 2005], chociaż wydajność fotosyntezy może się zmniejszyć w dłuższym okresie [Bowes 1993; Saxe i in. 1998]. Zjawisko to nazywane jest aklimatyzacją fotosyntezy do CO_2. Wysokie stężenie tego gazu może też ograniczać respirację (oddychanie), chociaż różne, krótko- lub długoterminowe komponenty oddychania reagują różnorodnie na stężenie CO_2 [Drake i in. 1999; Hamilton i in. 2001]. Dlatego wpływ zwiększonej koncentracji CO_2 na oddychanie roślin nie jest do końca dobrze poznany [Norby i in. 1999]. Niemniej jednak, wzrost i produktywność drzewostanów generalnie wrasta w podwyższonym CO_2 [Norby i in. 2005; Finzi i in. 2007].

Zwiększona koncentracja CO_2 prowadzi z reguły do redukcji przewodzenia szparkowego i transpiracji (utraty wody) [Medlyn i in. 2001; Ainsworth, Long 2005]. Na poziomie indywidualnych liści zwiększona efektywność wykorzystania wody (EWW – stosunek fotosyntezy do transpiracji) jest często obserwowanym zjawiskiem [Ceulemans, Mousseau 1994; Drake i in. 1997; Wullschleger i in. 2002b], co równie często prowadzi do prognozowania zwiększonej odporności lasów na suszę w atmosferze wzbogaconej w CO_2. Niestety, takie wnioskowanie jest problematyczne, ponieważ gatunki różnią się reaktywnością przewodzenia szparkowego na koncentrację CO_2 [Medlyn i in. 2001; Ainsworth, Rogers 2007]. Ponadto, bezpośrednie przełożenie EWW z poziomu liści na poziom ekosystemu nie jest proste [Wullschleger i in. 2002a], a obok EWW wiele innych procesów i reakcji drzew na zmiany klimatu może determinować odporność drzew i drzewostanów na suszę.

Ponieważ zmiany czynników klimatycznych nie będą oderwane od siebie, istotne jest poznanie wpływu ich współdziałania na drzewa i lasy. Tak więc powyższy obraz zmian fizjologicznych w reakcji na zwiększoną koncentrację CO_2 może być skomplikowany przez zmiany temperatury. Stosunek fotorespiracji do asymilacji generalnie wzrasta wraz ze wzrostem temperatury, zmniejszając wydajność fotosyntezy [Saxe i in. 2001]. Ten negatywny efekt ocieplenia powinien być częściowo zrekompensowany przez zwiększoną koncentrację CO_2 [Long 1991; Lewis i in. 1996], co jednak nie zawsze jest obserwowane [Tjoelker i in. 1998]. Dodatkowo, aklimatyzacja fotosyntezy i oddychania do temperatury [Atkin, Tjoelker 2003; Way, Sage 2008] sugeruje, że zarówno wiązanie, jak i utrata węgla mogą być mniejsze w dłuższym okresie niż spodziewane na podstawie natychmiastowych reakcji tych procesów na zmiany temperatury.

Obok reakcji podstawowych procesów fizjologicznych drzew na ocieplenie, dobrze udokumentowane są również zmiany w fenologii, takie jak wcześniejsze występowanie fenofaz wiosennych w reakcji na rosnący trend temperatury w ciągu XX wieku [Badeck i in. 2004; Parmesan 2007]. Zmiany te wskazują na przedłużenie sezonu wegetacyjnego wraz z postępującym ociepleniem. Z drugiej strony, znaczne ocieplenie zimą może powodować, że wymagania chłodu niektórych gatunków mogą zostać niespełnione, prowadząc w konsekwencji do zaburzeń wzrostu i rozwoju [Cannell, Smith 1983; Murray i in. 1989].

Jednym z ważniejszych efektów zmian klimatycznych będzie ich wpływ na odporność i zdrowotność drzewostanów. Abiotyczne stresy, takie jak susze i powodzie, nie tylko ograniczają wzrost, ale też zwiększają podatność drzew na szkodniki i choroby [Bidart-Bouzat, Imeh-Nathaniel 2008]. Dodatkowo, zmiany klimatu bezpośrednio wpływają na biologię szkodliwych organizmów, co w połączeniu z reakcjami roślinnymi może prowadzić do zmiennych i trudno przewidywalnych współzależności między rośliną żywicielską a szkodnikiem czy patogenem [Coakley i in. 1999; Zvereva, Kozlov 2006]. Wraz z ociepleniem i intensywniejszymi suszami, gradacje owadów spodziewane są częściej, prowadząc do zwiększonej śmiertelności i znacznych zmian w ekosystemach leśnych [Breshears i in. 2009]. Bardzo prawdopodobnym skutkiem zmian klimatycznych będzie również zwiększona częstotliwość, intensywność i rozmiar pożarów [McKenzie i in. 2004; Westerling i in. 2006]. Dlatego znaczenie wydarzeń klęskowych, jak też zapobiegania im i postępowania poklęskowego, będzie rosło w przyszłym gospodarstwie leśnym. Obok zmian klimatu i związanych z nimi stresów, skład gatunkowy oraz struktura wiekowa i przestrzenna lasów będą wpływały na występowanie i rozmiar klęsk naturalnych.

Podsumowując, zwiększona koncentracja atmosferycznego CO_2 i niewielki wzrost temperatury mogą potencjalnie pozytywnie wpłynąć na wzrost drzew i drzewostanów w przyszłości. Podkreślić jednak należy, że wpływ zmian klimatu na drzewa i ekosystemy leśne będzie uzależniony od współdziałania wszystkich czynników klimatycznych. Przy braku lub niewielkich zmianach ilości opadów, ocieplenie może prowadzić do częstszych i bardziej intensywnych okresów suszy. Interakcje czynników klimatycznych z naturalnymi klęskami będą oddziaływać na kształt i strukturę przyszłych lasów. Powyższa dyskusja dotyczy zaledwie niektórych spodziewanych reakcji drzew i drzewostanów na zmiany klimatyczne. Wiele innych procesów zarówno na poziomie indywidualnych drzew, jak i w skali ekosystemów leśnych, takich jak np. odżywianie mineralne, rozkład i obieg materii, konkurencja, reprodukcja, regeneracja i śmiertelność, może potencjalnie reagować na zmiany składu atmosfery, temperatury i wilgotności. W odróżnieniu jednak od dobrze rozpoznanych fizjologicznych i ekologicznych podstaw reakcji roślin drzewiastych na zmiany koncentracji CO_2, temperatury i wilgotności, reakcje na jednoczesne zmiany kilku tych czynników oraz mechanizmy stojące za tymi reakcjami, szczególne na poziomie ekosystemu, pozostają niedostatecznie wyjaśnione.

Ewolucyjne podstawy przystosowania lasów do zmian klimatycznych

Ponieważ przystosowanie lub adaptacja są różnorodnie definiowane w literaturze dotyczącej problemów zmian klimatycznych, należy jasno określić, co jest rozumiane pod tymi pojęciami. Międzyrządowy Panel do Spraw Zmian Klimatu (IPCC) definiuje adaptację jako *„przystosowanie naturalnych lub ludzkich systemów w reakcji na faktyczne lub spodziewane wpływy klimatu [...], dzięki któremu możliwe jest zmniejszenie strat lub odniesienie korzyści"* [Climate... 2001]. Tak szeroko rozumianej adaptacji poświęcony będzie następny rozdział. W niniejszym natomiast, więcej miejsca zostanie poświęcone naturalnej zdolności adaptacyjnej biocenoz leśnych. Pojęcia przystosowanie i adaptacja będą używane zamiennie.

Z wielu doświadczeń proweniencyjnych wynika, że populacje drzew są przystosowane genetycznie do warunków klimatycznych miejsca swojego pochodzenia [np. Rehfeldt 1988; Giertych 1991; Skroppa, Magnussen 1993; St.Clair i in. 2005]. Tak rozumiana adaptacja jest procesem ewolucyjnym, który przez dobór naturalny kształtuje strukturę genetyczną populacji. W reakcji na zmiany klimatu w przeszłości zmieniały się również naturalne zasięgi gatunków oraz ich genetyczna struktura. W odniesieniu do drzew leśnych jednym z procesów odpowiedzialnych za te ewolucyjne zmiany jest migracja poprzez rozsiew nasion i pyłku. Niestety, w porównaniu z tempem obecnie zachodzących zmian klimatycznych, tempo naturalnej migracji może okazać się niewystarczające dla wielu gatunków i populacji [Neilson i in. 2005; Aitken i in. 2008]. Ponadto, w krajobrazie zmienionym przez człowieka, naturalne procesy migracyjne będą z pewnością zaburzone. Pewną rolę w przystosowaniu do zmian klimatu może odegrać plastyczność fenotypowa – indywidualna zmienność osobnicza, która obejmuje np. zmiany fizjologii w odpowiedzi na zmiany środowiska. Jednak w odniesieniu do postępujących zmian klimatu, plastyczność fenotypowa będzie ograniczona do reakcji obecnie rosnących drzew i jako taka będzie przydatna tylko w relatywnie krótkim okresie. Dlatego adaptacja w sensie ewolucyjnym będzie wymagana na poziomie populacji i gatunków w dłuższym czasie (stulecie i dłużej).

Rozpatrując naturalną zdolność adaptacyjną ekosystemów leśnych, należy podkreślić ogromne znaczenie utrzymania zdrowych biocenoz leśnych oraz zapewnienia procesu odnowienia. Dostosowanie składu gatunkowego do siedliska odgrywa tutaj kluczową rolę. Wspomniana wcześniej międzypopulacyjna zmienność wskazuje jednak, że populacje wewnątrz gatunku będą reagowały różnorodnie na zmiany klimatu. Dlatego reakcja na zmiany klimatyczne nie może być rozpatrywana całościowo dla gatunku, ale musi być oceniana dla indywidualnych populacji [Ledig, Kitzmiller 1992; Matyas 1994; Reich, Oleksyn 2008]. Struktura wiekowa, gatunkowa i przestrzenna na poziomie drzewostanów oraz w krajobrazie leśnym, będzie również determinowała reakcje biocenoz leśnych na zmieniające się warunki klimatyczne. Należy podkreślić, że leśnicy mogą i powinni wykorzystać naturalne zdolności przystosowawcze drzew i ekosystemów leśnych, by zapewnić ciągłość naturalnie zrównoważonej gospodarki leśnej w zmieniającym się środowisku naturalnym.

Przystosowanie lasów i leśnictwa w Polsce do zmian klimatu

Wśród licznych opracowań na temat zmian klimatycznych i leśnictwa w ostatnim czasie wiele uwagi poświęca się nowemu podejściu do planowania w gospodarce leśnej. Jego głównym motywem jest włączenie zmienności, a zatem również zmian klimatycznych, do procesu decyzyjnego. Istotne jest tutaj przede wszystkim przejście od koncepcji pojedynczego stanu dynamicznej równowagi do wielu stanów równowagi dla danego systemu [Gunderson 2000]. W tym kontekście ważna staje się wiedza na temat prognozowanych zmian klimatu, obecnego stanu, w jakim znajduje się system (leśnictwo jako obszar zarządzania oraz lasy jako naturalne ekosystemy) oraz tego, jak zmiany klimatu mogą na system wpłynąć. Tylko wtedy możliwe będzie zaplanowanie przystosowania do nich. Nowe strategie i opcje przystosowawcze określą czy obecne zabiegi gospodarcze powinny być zmienione by zapewnić utrzymanie i rozwój zdrowych lasów i trwale zrównoważonej gospodarki leśnej.

W tabeli zamieszczono podsumowanie proponowanych w literaturze strategii i opcji adaptacyjnych w lasach i leśnictwie. W ich skład będą wchodziły konkretne wskazania gospodarcze. Zamierzeniem autorów nie jest jednak wskazanie, które zabiegi, jak i kiedy powinny być wykonane, ponieważ szczegółowe rozwiązania będą uzależnione od wrażliwości klimatycznej konkretnych biocenoz leśnych oraz lokalnych uwarunkowań przyrodniczych, społecznych i ekonomicz-

Tabela

Przegląd proponowanych w literaturze strategii i opcji adaptacyjnych dla lasów i leśnictwa w obliczu zmian klimatycznych

Review of adaptive strategies and options in forest ecosystems and forestry in the face of climate change

Strategie i opcje	E	W	P	Źródła
Kategoria I: Przystosowanie procesu decyzyjnego i zarządzania w leśnictwie				
A) Włączenie elementu niepewności i analizy ryzyka do zarządzania i podejmowania decyzji	x	x	x	Peters 1990; Ledig, Kitzmiller 1992; Spittlehouse, Stewart 2003; Spittlehouse 2005; McLachlan i in. 2007; Millar i in. 2007; Nitschke, Innes 2008
B) Promocja procesu przystosowania, niekoniecznie utrzymania obecnego stanu	?	x	x	Gunderson 2000; Spittlehouse 2005; Millar i in. 2007; Nitschke, Innes 2008
C) Traktowanie klęsk jako możliwości przebudowy ekosystemu w celu dostosowania do nowych warunków	x	x	x	Spittlehouse, Stewart 2003; Drever i in. 2006; Millar i in. 2007
D) „Elastyczne zarządzanie". Monitoring zachodzących zmian i efektywności podjętych zabiegów	?	x	x	Gunderson 2000; Dale i in. 2001; Ohlson i in. 2005; Millar i in. 2007
Kategoria II: Przystosowanie ekosystemów leśnych				
E) Ochrona siedlisk i gatunków				
1. Ochrona różnych typów lasu w różnych warunkach środowiskowych. Utrzymanie różnorodności wiekowej i gatunkowej w krajobrazie	x	x	x	Peters 1990; Halpin 1997; Noss 2001; Drever i in. 2006; Millar i in. 2007
2. Ochrona kluczowych oraz najbardziej zagrożonych gatunków i populacji.	x	x	–	Halpin 1997; Noss 2001; Spittlehouse, Stewart 2003; Millar i in. 2007
3. Unikanie fragmentacji i tworzenie korytarzy ekologicznych.	x	x	–	Halpin 1997; Noss 2001; Spittlehouse, Stewart 2003; Millar i in. 2007
4. Ochrona historycznych refugiów oraz tworzenie nowych „refugiów klimatycznych"	x	x	–	Noss 2001; Millar i in. 2007
5. Utrzymanie naturalnego cyklu rozwoju (sukcesji), włączając katastrofalne pożary i gradacje szkodników owadzich	?	x	–	Halpin 1997; Noss 2001; Drever i in. 2006
F) Zwiększenie odporności ekosystemów na stresy oraz przyspieszenie procesu odnowy				
1. Zmiana składu gatunkowego i struktury drzewostanu w celu dostosowania do siedliska – czyszczenia, trzebieże, podsadzenia	x	x	x	Dale i in. 2001; Nitschke, Innes 2008
2. Przyspieszenie procesu odnowy lub przebudowy po klęskach – uprzątanie, sadzenie (odnowienie naturalne)	?	x	x	Dale i in. 2001
3. Zachowanie między- i wewnątrzgatunkowej zmienności genetycznej, włączając zachowanie zasobów genowych *ex-situ*	x	x	x	Ledig, Kitzmiller 1992; Noss 2001
4. Zmiana zasad przenoszenia nasion – kontrolowana „wspomagana migracja"	?	x	x	Peters 1990; Ledig, Kitzmiller 1992; McLachlan i in. 2007; Millar i in. 2007; Nitschke, Innes 2008
5. Sadzenie upraw (plantacji) wielogatun./ mieszanie genotypów (patrz punkt powyżej)	?	x	x	Ledig, Kitzmiller 1992; Vanclay 2009

E – lasy pełniące głównie funkcje ekologiczne i społeczne; W – lasy wielofunkcyjne; P – lasy produkcyjne; x – strategie i opcje zgodne z funkcjami lasu; – strategie i opcje niezgodne z funkcjami lasu; ? – brak informacji na temat zgodności z funkcjami lasu

E – ecological and societal forests; W – multiple-use forests; P – commercial forests; x – strategies and options compatible with major forest functions; – strategies and options incompatible with major forest functions; ? – inadequate information on compatibility

nych. Dyskusja w tym artykule ogranicza się więc do określenia ram wskazujących kierunki planowania w obliczu zmian klimatycznych.

Prezentowany przegląd strategii i opcji adaptacyjnych zawiera również ocenę ich zgodności z wiodącymi funkcjami pełnionymi przez las (tab.). Chociaż funkcje ekologiczne, społeczne i produkcyjne traktowane są równorzędnie w Polityce Leśnej Państwa [1997], jest oczywistym, że każdy pojedynczy drzewostan czy nawet większa jednostka przestrzenna nie może pełnić wszystkich tych funkcji w jednakowym stopniu. Dlatego w ujęciu obecnego opracowania wyszczególniono trzy typy lasów – pełniące głównie funkcje ekologiczne i społeczne (E), pełniące głównie funkcje produkcyjne (P) oraz lasy typowo wielofunkcyjne (W). Dwie główne kategorie przyporządkowujące planowane strategie adaptacyjne to przystosowanie procesu zarządzania w leśnictwie, odnoszące się do adaptacji systemów ludzkich (Kategoria I), oraz przystosowanie ekosystemów leśnych, podkreślające głównie przystosowanie ewolucyjne (Kategoria II).

Przystosowanie procesu decyzyjnego i zarządzania w leśnictwie

Scenariusze zmian klimatu obciążone są w różnym stopniu niepewnością. Podobnie, reakcje drzew i biocenoz leśnych mogą mieścić się w pewnych ramach określonych przez zmienność gatunkową i populacyjną oraz strukturę wiekową i przestrzenną ekosystemów leśnych i zachodzące w nich naturalne procesy. Z reguły kierunki tych zmian są dużo lepiej określone i ugruntowane w wynikach eksperymentalnych niż ich wielkość. Z tego względu, dodatkowe elementy niepewności, jak i analiza ryzyka, powinny być włączone do procesu planowania i zarządzania (A; tab.). Analiza ryzyka wymaga jednak określenia prawdopodobieństwa spodziewanych zmian klimatycznych i ich konsekwencji dla ekosystemów leśnych [Snover i in. 2007]. Zagadnienia te pozostają ważnymi obszarami badawczymi wymagającymi głębszego poznania.

Strategia promowania procesu przystosowania w odróżnieniu od utrzymania obecnego stanu (B; tab.) jest ugruntowana w nowym kierunku rozwoju polskiego leśnictwa wdrażającego zasady trwale zrównoważonej gospodarki leśnej. Dostosowanie składu gatunkowego i struktury genetycznej do warunków siedliskowych jest kluczowym jej elementem. Ponieważ jednak gatunki reagują indywidualistycznie na zmiany klimatu, obecnie istniejące ekosystemy i zbiorowiska roślinne mogą ulec znacznym zmianom [Huntley 1991]. Dlatego strategia promująca proces przystosowania może wymagać rewizji istniejących planów hodowlanych czy ochronnych, a szczególnie podejścia do typu ochrony i dopuszczalności zabiegów wspomagających lub ukierunkowujących przystosowanie do zmieniających się warunków środowiska.

Wiele miejsca w literaturze poświęcono roli naturalnych klęsk, takich jak pożary czy gradacje owadów, w określaniu nowych strategii zarządzania. W nowym ujęciu takie przypadki powinny być traktowane jako okazja do nadania kierunku rozwoju ekosystemom leśnym, tak by ułatwić ich przystosowanie do nowych warunków klimatycznych (C; tab.). Z powodu długowieczności drzew, długi okres między kolejnymi pokoleniami może utrudniać adaptację przez dobór naturalny. Dlatego częściej występujące naturalne klęski mogą przyspieszyć przystosowanie lasów do szybko zmieniającego się klimatu, zgodnie z koncepcją następujących po sobie faz cyklu adaptacyjnego [Gunderson, Holling 2002; Drever i in. 2006]. Jednak nawracające klęski mogą też drastycznie zmienić ekosystemy leśne i nadać im kierunek i kształt, który nie był obserwowany w geologicznie nieodległej przeszłości [Millar i in. 2007]. Dlatego, jak wskazano powyżej, utrzymanie obecnego stanu, np. składu gatunkowego czy struktury przestrzennej, może okazać się niewykonalne lub pozbawione przesłanek, będzie jednak zależne od głównej funkcji pełnionej przez las (tab.).

Związane z opcjami zaprezentowanymi powyżej, „elastyczne zarządzanie" jest swego rodzaju nauką na błędach (D; tab.). Nie może być to jednak nauka oparta na ślepym wyborze opcji, lecz musi być poparta rzetelną wiedzą na temat spodziewanych kierunków zmian zarówno w klimacie, jak i w ekosystemach leśnych, tak by podjęte zabiegi wychodziły naprzeciw tym oczekiwaniom, a nie przebiegały „pod prąd". Elastyczne zarządzanie zakłada ze swej natury element niepewności oraz to, że zarządzany system będzie ulegał zmianom [Führer 2000; Gunderson 2000]. Kluczowymi elementami tej strategii jest efektywny monitoring i oparta na nim rewizja planów prowadzenia gospodarki leśnej. Wymaga to jasnego określenia celu gospodarczego (przy założeniu wiodącej funkcji lasu) oraz punktów wyjściowych, kierunku zmian, punktów lub stanów przejściowych i końcowych oraz kryteriów oceny systemu. Nie są to łatwe zadania, szczególnie w obliczu niepewności co do przyszłej natury ekosystemów leśnych w zmiennym klimacie, lecz muszą być oparte o najlepsze dostępne informacje.

PRZYSTOSOWANIE EKOSYSTEMÓW LEŚNYCH. Do kategorii przystosowania ekosystemów leśnych zalicza się dwie główne strategie adaptacyjne – ochronę siedlisk i gatunków oraz zwiększenie odporności ekosystemów na stresy (tab.). Pierwsze trzy opcje proponowane w ramach strategii ochrony siedlisk i gatunków (E; tab.) mają na celu zapobieżenie utracie bioróżnorodności na poziomie gatunków i populacji, ochronę naturalnych siedlisk oraz wspieranie naturalnej migracji w krajobrazie w reakcji na zmieniający się klimat. Jako ochronę różnorodnych typów lasu wymienioną w opcji E1 należy rozumieć zrównoważenie udziału poszczególnych funkcji lasu w krajobrazie leśnym wraz z całą gamą różnorodności gatunkowej, wiekowej i przestrzennej reprezentowanej przez te kategorie, jednak ze szczególnym uwzględnieniem lasów naturalnych. Należy podkreślić, że zaproponowany podział głównych funkcji lasu ma przeciwdziałać schematycznej gospodarce leśnej na poziomie krajobrazu. Ochrona najbardziej zagrożonych gatunków (E2) zakłada z reguły aktywną ochronę gatunków i populacji, które są narażone na negatywne wpływy zmian klimatycznych. Ochrona gatunków kluczowych powinna obejmować takie gatunki, których obecność w ekosystemach jest niezbędna dla zachowania zależnych od nich gatunków i procesów. Unikanie fragmentacji i tworzenie korytarzy ekologicznych (E3) ma natomiast na celu ułatwienie naturalnej migracji gatunkom i populacjom zdolnym do „dotrzymania kroku" postępującym zmianom klimatu. Opcja ta jest często proponowana w literaturze, jednak jej efektywność dla wspomagania naturalnej migracji wymaga szczegółowej oceny [Halpin 1997]. Ochrona historycznych refugiów (E4; tab.) odnosi się do miejsc, gdzie gatunki przetrwały okresy zmiennego klimatu w przeszłości, np. okresy zlodowaceń [Hewitt 2000]. Są to z reguły miejsca charakteryzujące się dużą różnorodnością gatunkową i zmiennością genetyczną i z tych względów powinny podlegać ochronie. Ochrona nie powinna jednak ograniczać się do historycznych refugiów. Różnorodność reprezentowana przez strefy mieszańcowe powstałe w wyniku zetknięcia linii z różnych refugiów podczas kolonizacji polodowcowej [Hewitt 2000] może okazać się przydatna dla określenia nowych „refugiów klimatycznych". Postępujące zmiany klimatu mogą też stworzyć warunki do bytowania gatunkom, które występowały na danym obszarze w przeszłości, a obecnie traktowane są jako nierodzime. Dlatego określenie historycznych zasięgów gatunków będzie pomocne w tworzeniu zarówno nowych refugiów, jak i „neo-naturalnych" lasów [Millar i in. 2007], których struktura i skład gatunkowy może odbiegać od obecnych wzorcowych fitocenoz.

Opcja utrzymania naturalnego cyklu rozwoju (E5; tab.) była częściowo omówiona powyżej w kontekście zarządzania. W tym miejscu podkreślona jest rola naturalnej sukcesji i naturalnych klęsk w kształtowaniu ekosystemów leśnych. Według niej klęski naturalne powinny być integralnym elementem przyszłych biocenoz leśnych. Takie imitujące naturę podejście do gospo-

darki leśnej ma zarówno zwolenników [Franklin i in. 2002; Drever i in. 2006], jak i przeciwników [Klenk i in. 2009]. Wydaje się jednak mieć miejsce w ekologicznym modelu leśnictwa, gdzie wielorakie funkcje lasu są traktowane równoważnie. Niemniej jednak, opcja ta będzie wymagała w wielu przypadkach rewizji celów hodowlanych lub ochronnych. Ponadto, dla wielu ekosystemów leśnych naturalna dynamika procesów takich jak sukcesja czy cykle klęsk (nawrót i intensywność), nie jest dostatecznie dobrze poznana [Bengtsson i in. 2000; Hüttl i in. 2000]. Wpływ zmian klimatycznych na owady i organizmy pasożytnicze oraz na ich interakcje z rośliną żywicielską wprowadza dodatkowy element niepewności, utrudniający wprowadzenie tej opcji. Poznanie tych zależności będzie tym bardziej konieczne dla dopracowania szczegółowych zaleceń wspomagających przystosowanie lasów do zmian klimatycznych.

Opcje adaptacyjne proponowane w strategii zwiększenia odporności ekosystemów na stresy i przyspieszenia procesu odnowy (F; tab.) zakładają bardziej intensywne zabiegi niż prezentowane powyżej opcje ochronne. W ich realizacji z reguły zakłada się aktywną gospodarkę leśną wspomagającą lub ukierunkowującą naturalne procesy przystosowawcze. Znaczenie dostosowania składu gatunkowego do siedliska jest dobrze znane polskim leśnikom i nie wymaga szerszego komentarza (F1; tab.). Przyspieszenie procesu odnowy lub przebudowy (F2; tab.) bazuje na koncepcji wykorzystania naturalnych klęsk jako okazji do przyspieszenia adaptacji ekosystemów leśnych.

Wspólnym elementem trzech ostatnich opcji proponowanych w tej strategii (F3, F4 i F5; tab.) jest rola zmienności genetycznej w przystosowaniu lasów do zmian klimatu. Zachowanie zmienności genetycznej jest „polisą ubezpieczeniową" na przyszłość. Istotne jest tu zachowanie zarówno różnorodności gatunkowej, jak i wewnątrzgatunkowej. Proces naturalnego odnowienia będzie przyczyniał się do zachowania populacji *in situ* pod warunkiem, że populacje te będą dostosowane do zmieniającego się klimatu. Szczególnie narażone gatunki i populacje powinny być chronione *ex situ* w archiwach klonów i bankach genów.

Opcja zmiany zasad przenoszenia nasion związana jest z koncepcją wspomaganej migracji (F4; tab.). Wspomagana migracja proponowana jest zwykle w odniesieniu do zagrożonych gatunków, chociaż wzbudza wiele kontrowersji [McLachlan i in. 2007; Hoegh-Guldberg i in. 2008]. W odróżnieniu od wspomaganej migracji na poziomie gatunku, proponowana tutaj opcja zakłada przenoszenie populacji (genotypów) w ramach naturalnego zasięgu gatunku [O'Neill i in. 2008]. Stoi ona w niewielkiej opozycji do zasad obowiązującej regionalizacji nasiennej [Załęski 2000], które przeciwdziałają przenoszeniu materiału genetycznego, tak by ograniczyć nieprzystosowanie do warunków środowiskowych. Nowa koncepcja zakłada zmianę zasad przenoszenia nasion, tak by ułatwić przystosowanie populacji do klimatu spodziewanego w przyszłości, np. z miejsc o klimacie cieplejszym do miejsc o klimacie chłodniejszym [Ledig, Kitzmiller 1992]. Hodowla selekcyjna ma do odegrania szczególną rolę w kształtowaniu tej opcji dostarczając empirycznych wyników na temat tolerancji klimatycznej populacji i szczegółów dotyczących skali dopuszczalnego transferu nasion. Opcja ta wymaga też wiarygodnych modeli regionalnego klimatu.

ZGODNOŚĆ PROPONOWANYCH STRATEGII I OPCJI ADAPTACYJNYCH Z WIODĄCYMI FUNKCJAMI LASU. Proponowane powyżej strategie i opcje adaptacyjne wpisują się w koncepcję wielofunkcyjnej gospodarki leśnej. Wybór poszczególnych możliwości musi być oparty o ocenę zagrożenia i zdolności przystosowawczych lasów, bazujących na prognozach zmian klimatycznych i ich oddziaływania na biocenozy leśne. Z kolei fizjologiczne i ekologiczne reakcje ekosystemów leśnych na zmiany klimatu muszą być połączone z analizą obecnego stanu ekosystemów, celu gospodarczego oraz sytuacji ekonomicznej i oczekiwań społecznych.

Wykonalność i efektywność proponowanych strategii i opcji będzie zatem zależna od ich zgodności z wiodącymi funkcjami lasów (tab.). Adaptacja procesu zarządzania w świetle zmian klimatycznych wydaje się być stosunkowo łatwa w odniesieniu do lasów typowo produkcyjnych. Chociaż zwykle uproszczona struktura tych lasów ogranicza ich naturalne zdolności przystosowawcze, lasy produkcyjne mogą być zarządzane elastycznie. Wynika to ze względnej łatwości określenia ich celów gospodarczych, które mogą zmienić się stosunkowo szybko, np. w reakcji na zmieniające się wymagania rynku; oraz z dopuszczalności bardziej intensywnych zabiegów gospodarczych. Trudność w określeniu zgodności strategii adaptacyjnych z funkcjami lasu wzrasta wraz ze wzrastającym poziomem zróżnicowania struktury i funkcji lasów. Wiedza na temat długookresowych skutków zmian klimatycznych w polskich lasach wydaje się niewystarczająca do wprowadzenia niektórych z tych strategii w lasach o funkcjach społecznych i ekologicznych (np. D; tab.), gdzie niektóre z tych strategii mogą też spotkać się z brakiem akceptacji społecznej (np. B; tab.).

W kategorii przystosowania ekosystemów leśnych, opcje opierające się na ochronie siedlisk i gatunków (E; tab.) są zgodne z gospodarką wielofunkcyjną oraz ekologiczną i społeczną funkcją lasów, chociaż dopuszczalność zabiegów gospodarczych będzie różna dla tych dwóch głównych grup funkcji lasów. Z założenia, rola wielofunkcyjnego lasu powinna dopuszczać bardziej intensywne zabiegi ochronne, które mogą nie być akceptowane w lasach typowo ochronnych, pełniących funkcje ekologiczne. Opcje te mają natomiast ograniczoną zgodność z produkcyjną funkcją lasu (E; tab.). Strategia zwiększania odporności ekosystemów (F; tab.) jest zasadniczo zgodna ze wszystkimi trzema głównymi grupami funkcji lasów, chociaż pewną trudność nasuwa określenie zgodności poszczególnych opcji z funkcjami ekologicznymi i społecznymi. Należą tu przede wszystkim opcje F4 i F5 (tab.), które zakładają przenoszenie materiału genetycznego. Podjęcie szczegółowych rozwiązań w opcji przebudowy po klęskach (F2; tab.) również może napotkać trudności w konfrontacji z ekologiczną i społeczną funkcją lasów.

W odniesieniu do wszystkich proponowanych strategii i opcji należy podkreślić, że wprowadzenie nowych strategii lub modyfikacja już istniejących musi mieć odpowiednie podstawy naukowe i wymagać będzie edukacji w środowisku leśników i społeczeństwie.

Podsumowanie

Przemiany, jakie dokonały się w polskim leśnictwie po przejściu z gospodarki centralnie planowanej do gospodarki rynkowej, spowodowały przewartościowanie celów gospodarki leśnej. Obecny model leśnictwa wielofunkcyjnego oparty o zasady trwale zrównoważonego rozwoju, zwiększa naturalną odporność ekosystemów i pozwala mieć nadzieję, że polskie lasy będą zdolne do zabsorbowania zmian klimatu w ciągu tego stulecia i wypełnienia wszystkich postawionych przed nimi zadań.

Jednym z czynników determinujących zdolności przystosowawcze leśnictwa jest struktura własnościowa, w dużej mierze określająca poziom podejmowania decyzji. W odróżnieniu od wielu krajów o zróżnicowanej strukturze własności, a co za tym idzie znacznym zróżnicowaniu celów gospodarki leśnej, w miarę jednolita struktura polskich lasów sprzyja ujednoliceniu celów gospodarczych lub ochronnych oraz priorytetów działań (co nie oznacza gospodarki schematycznej). Ponadto, poziom zarządzania w polskich lasach pozwala na planowanie i koordynację działań w skali wielkoobszarowej, co jest niezbędne w świetle skutków zmian klimatycznych, które obserwowane są w skali regionalnej, a nie poszczególnych drzewostanów. Dlatego obecna struktura własnościowa lasów w Polsce zwiększa ich zdolności przystosowawcze. Ze strukturą własnościową lasów wiążą się też jednak pewne ograniczenia. Gospodarowanie w lasach oparte

jest o plany urządzenia lasu, które mogą ograniczać elastyczność w podejmowaniu decyzji. Wynika to z tradycyjnego podejścia do planowania bazującego na założeniu dynamicznej równowagi, które może okazać się nieprzydatne w warunkach szybko postępujących zmian klimatu. Strategia włączenia zmian klimatu do procesu planowania musi znaleźć swoje miejsce w planach urządzenia lasu [Głaz i in. 2008], które powinny pozwalać na zwiększoną elastyczność zarządzania. Ponadto należy zastanowić się nad rolą lasów prywatnych w wielofunkcyjnej gospodarce leśnej. Polityka Leśna Państwa [1997] rozszerza realizację celów polityki leśnej na lasy wszystkich form własności. Jednak, przy obecnej rozdrobnionej strukturze przestrzennej lasów prywatnych [Król 2008], być może powinno znaleźć się miejsce dla bardziej elastycznego określenia celów gospodarczych w lasach tej formy własności, tak by te cele odpowiadały zarówno założeniom PLP, jak i oczekiwaniom właścicieli lasów i lokalnych społeczności.

Szczególną, aczkolwiek nie do końca zrealizowaną, rolę do odegrania w procesie przystosowania lasów i leśnictwa do zmian klimatu mają Leśne Kompleksy Promocyjne (LKP). Powinny one służyć jako obszary modelowe we wdrażaniu założeń PLP i leśnictwa wielofunkcyjnego [Szujecki, Zaleski 2005]. Jako model, LKP powinny być obszarami aktywnych działań polegających między innymi na określaniu, wdrażaniu, ocenie i rewizji nowych strategii adaptacyjnych, które będą uwzględniały oczekiwania społeczne oraz cele hodowlane i ochronne, bazując na istniejących uwarunkowaniach przyrodniczych, ekonomicznych i społecznych oraz prognozowanych efektach zmian klimatycznych. Niezmiernie ważna jest także rola LKP jako jednostek dydaktycznych, ukazujących celowość i efektywność podejmowanych działań.

Lasy Państwowe cieszą się chlubną tradycją wspierania nauki leśnej. W obliczu wielu niepewności związanych ze zmianami klimatu oraz reakcją lasów i leśnictwa na te zmiany, rośnie potrzeba odpowiedzi na rodzące się pytania. Niezbędne są badania zarówno w dziedzinie fizjologicznych reakcji drzew na stres i ich konsekwencji dla ekosystemów leśnych, jak też mające bardziej praktyczny wymiar doświadczenia w dziedzinie hodowli selekcyjnej drzew leśnych, zabiegów hodowlanych oraz zarządzania i ekonomiki leśnictwa, tak by podejmowane decyzje opierały się na solidnych naukowych podstawach. Dalsza współpraca nauki z gospodarką leśną jest niezbędnym elementem na drodze przystosowania lasów i leśnictwa do zmieniającego się klimatu.

Literatura

Aber J., Neilson R. P., McNulty S., Lenihan J. M., Bachelet D., Drapek R. J. 2001. Forest processes and global environmental change: Predicting the effects of individual and multiple stressors. Bioscience 51 (9): 735-751.

Ainsworth E. A., Long S. P. 2005. What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2. New Phytologist 165 (2): 351-371.

Ainsworth E. A., Rogers A. 2007. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising $[CO_2]$: mechanisms and environmental interactions. Plant Cell and Environment 30 (3): 258-270.

Aitken S. N., Yeaman S., Holliday J. A., Wang T., Curtis-McLane S. 2008. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. Evolutionary Applications: 95-111.

Atkin O. K., Tjoelker M. G. 2003. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. Trends in Plant Science 8 (7): 343-351.

Badeck F. W., Bondeau A., Bottcher K., Doktor D., Lucht W., Schaber J., Sitch S. 2004. Responses of spring phenology to climate change. New Phytologist 162 (2): 295-309.

Bengtsson J., Nilsson S. G., Franc A., Menozzi P. 2000. Biodiversity, disturbances, ecosystem function and management of European forests. Forest Ecology and Management 132 (1): 39-50.

Bernadzki E. 1995. Gospodarka leśna w obliczu zmian klimatu. Sylwan 139 (1): 19-32.

Bidart-Bouzat M. G., Imeh-Nathaniel A. 2008. Global change effects on plant chemical defenses against insect herbivores. Journal of Integrative Plant Biology 50 (11): 1339-1354.

Bowes G. 1993. Facing the inevitable: plants and increasing atmospheric CO_2. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 44 (1): 309-332.

Breshears D. D., Myers O. B., Meyer C. W., Barnes F. J., Zou C. B., Allen C. D., McDowell N. G., Pockman W. T. 2009. Tree die-off in response to global-change type drought: mortality insights from a decade of plant water potential measurements. Frontiers in Ecology and the Environment 7 (4): 185-189.

Cannell M. G. R., Smith R. I. 1983. Thermal time, chill days and prediction of budburst in *Picea sitchensis*. Journal of Applied Ecology 20 (3): 951-963.

Ceulemans R., Mousseau M. 1994. Effects of elevated atmospheric CO_2 on woody plants. New Phytologist 127 (3): 425-446.

Christensen J. H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R. K., Kwon W.-T., Laprise R., Magaña Rueda V., Mearns L., Menéndez C. G., Räisänen J., Rinke A., Sarr A., Whetton P. 2007. Regional Climate Projections. W: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 848-940.

Climate Change 2001: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2001. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK and New York, NY, USA, Cambridge University Press.

Coakley S. M., Scherm H., Chakraborty S. 1999. Climate change and plant disease management. Annual Review of Phytopathology 37: 399-426.

Curtis P. S., Wang X. Z. 1998. A meta-analysis of elevated CO_2 effects on woody plant mass, form, and physiology. Oecologia 113 (3): 299-313.

Dale V. H., Joyce L. A., McNulty S., Neilson R. P., Ayres M. P., Flannigan M. D., Hanson P. J., Irland L. C., Lugo A. E., Peterson C. J., Simberloff D., Swanson F. J., Stocks B. J., Wotton B. M. 2001. Climate change and forest disturbances. Bioscience 51 (9): 723-734.

Drake B. G., Azcon-Bieto J., Berry J., Bunce J., Dijkstra P., Farrar J., Gifford R. M., Gonzalez-Meler M. A., Koch G., Lambers H., Siedow J., Wullschleger S. 1999. Does elevated atmospheric CO_2 concentration inhibit mitochondrial respiration in green plants? Plant Cell and Environment 22 (6): 649-657.

Drake B. G., GonzalezMeler M. A., Long S. P. 1997. More efficient plants: A consequence of rising atmospheric CO_2? Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 48: 609-639.

Drever C. R., Peterson G., Messier C., Bergeron Y., Flannigan M. 2006. Can forest management based on natural disturbances maintain ecological resilience? Canadian Journal of Forest Research 36 (9): 2285-2299.

Fabijanowski J., Jaworski A. 1996. Kierunki postępowania hodowlanego w lasach karpackich wobec zmieniających się warunków środowiska. Sylwan 140 (4): 5-28.

Finzi A. C., Norby R. J., Calfapietra C., Gallet-Budynek A., Gielen B., Holmes W. E., Hoosbeek M. R., Iversen C. M., Jackson R. B., Kubiske M. E., Ledford J., Liberloo M., Oren R., Polle A., Pritchard S., Zak D. R., Schlesinger W. H., Ceulemans R. 2007. Increases in nitrogen uptake rather than nitrogen-use efficiency support higher rates of temperate forest productivity under elevated CO_2. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 104 (35): 14014-14019.

Franklin J. F., Spies T. A., Pelt R. V., Carey A. B., Thornburgh D. A., Berg D. R., Lindenmayer D. B., Harmon M. E., Keeton W. S., Shaw D. C., Bible K., Chen J. 2002. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. Forest Ecology and Management 155 (1-3): 399-423.

Führer E. 2000. Forest functions, ecosystem stability and management. Forest Ecology and Management 132 (1): 29-38.

Giertych M. 1991. Provenance variation in growth and phenology. W: Giertych M., Matyas C. Genetics of Scots pine. Amsterdam, Elsevier Science Publishers. 87-101.

Głaz J., Czerepko J., Jabłoński M., Zajączkowski G. 2008. Kierunki doskonalenia zasad urządzania lasu w celu realizacji trwale zrównoważonej gospodarki leśnej. Sylwan 152 (1): 37-44.

Gunderson L. H. 2000. Ecological resilience – in theory and application. Annual Review of Ecology and Systematics 31: 425-439.

Gunderson L. H., Holling C. S., Eds. 2002. Panarchy: Understanding Transformations in Human and Natural Systems. Washington D.C., USA, Island Press.

Halpin P. N. 1997. Global climate change and natural-area protection: Management responses and research directions. Ecological Applications 7 (3): 828-843.

Hamilton J. G., Thomas R. B., Delucia E. H. 2001. Direct and indirect effects of elevated CO_2 on leaf respiration in a forest ecosystem. Plant Cell and Environment 24 (9): 975-982.

Hewitt G. 2000. The genetic legacy of the Quaternary ice ages. Nature 405 (6789): 907-913.

Hobbins M. T., Dai A. G., Roderick M. L., Farquhar G. D. 2008. Revisiting the parameterization of potential evaporation as a driver of long-term water balance trends. Geophysical Research Letters 35 (12).

Hoegh-Guldberg O., Hughes L., McIntyre S., Lindenmayer D. B., Parmesan C., Possingham H. P., Thomas C. D. 2008. Assisted colonization and rapid climate change. Science 321 (5887): 345-346.

Huntley B. 1991. How plants respond to climate change: migration rates, individualism and the consequences for plant communities. Annals of Botany 67 (Suppl. 1): 15-22.

Hüttl R. F., Schneider B. U., Farrell E. P. 2000. Forests of the temperate region: gaps in knowledge and research needs. Forest Ecology and Management 132 (1): 83-96.

Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment. 2008 European Environment Agency, Report No 4/2008, Copenhagen, Denmark.

Klenk N. L., Bull G. Q., MacLellan J. I. 2009. The 'emulation of natural disturbance' (END) management approach in Canadian forestry: A critical evaluation. Forestry Chronicle 85 (3): 440-445.

Kowalski M. 1994. Zmiany składu gatunkowego lasów na tle zmian klimatu w ostatnich dwóch stuleciach. Sylwan 138 (9): 33-48.

Król A. 2008. Organizacyjne aspekty nadzoru nad lasami prywatnymi. Sylwan 152 (3): 58-65.

Ledig F. T., Kitzmiller J. H. 1992. Genetic strategies for reforestation in the face of global climate change. Forest Ecology and Management 50 (1-2): 153-169.

Lewis J. D., Tissue D. T., Strain B. R. 1996. Seasonal response of photosynthesis to elevated CO_2 in loblolly pine (*Pinus taeda* L) over two growing seasons. Global Change Biology 2 (2): 103-114.

Long S. P. 1991. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO_2 concentrations: Has its importance been underestimated? Plant, Cell and Environment 14 (8): 729-739.

Matyas C. 1994. Modeling climate change effects with provenance test data. Tree Physiology 14 (7-9): 797-804.

McKenzie D., Gedalof Z., Peterson D. L., Mote P. 2004. Climatic change, wildfire, and conservation. Conservation Biology 18 (4): 890-902.

McLachlan J. S., Hellmann J. J., Schwartz M. W. 2007. A framework for debate of assisted migration in an era of climate change. Conservation Biology 21 (2): 297-302.

Medlyn B. E., Barton C. V. M., Broadmeadow M. S. J., Ceulemans R., De Angelis P., Forstreuter M., Freeman M., Jackson S. B., Kellomaki S., Laitat E., Rey A., Roberntz P., Sigurdsson B. D., Strassemeyer J., Wang K., Curtis P. S., Jarvis P. G. 2001. Stomatal conductance of forest species after long-term exposure to elevated CO_2 concentration: a synthesis. New Phytologist 149 (2): 247-264.

Meehl G. A., Stocker T. F., Collins W. D., Friedlingstein P., Gaye A. T., Gregory J. M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J. M., Noda A., Raper S. C. B., Watterson I. G., Weaver A. J., Zhao Z.-C. 2007. Global climate projections. W: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 747-845.

Millar C. I., Stephenson N. L., Stephens S. L. 2007. Climate change and forests of the future: Managing in the face of uncertainty. Ecological Applications 17 (8): 2145-2151.

Mohan J. E., Cox R. M., Iverson L. R. 2009. Composition and carbon dynamics of forests in northeastern North America in a future, warmer world. Canadian Journal of Forest Research 39 (2): 213-230.

Murray M. B., Cannell M. G. R., Smith R. I. 1989. Date of budburst of fifteen tree species in Britain following climatic warming. Journal of Applied Ecology 26 (2): 693-700.

Nakicenovic N., Swarts R. 2000. Special report on emissions scenarios. Cambridge, UK, Cambridge University Press.

Neilson R. P., Pitelka L. F., Solomon A. M., Nathan R., Midgley G. F., Fragoso J. M. V., Lischke H., Thompson K. 2005. Forecasting regional to global plant migration in response to climate change. Bioscience 55 (9): 749-759.

Nitschke C. R., Innes J. L. 2008. Integrating climate change into forest management in South-Central British Columbia: An assessment of landscape vulnerability and development of a climate-smart framework. Forest Ecology and Management 256 (3): 313-327.

Norby R. J., DeLucia E. H., Gielen B., Calfapietra C., Giardina C. P., King J. S., Ledford J., McCarthy H. R., Moore D. J. P., Ceulemans R., De Angelis P., Finzi A. C., Karnosky D. F., Kubiske M. E., Lukac M., Pregitzer K. S., Scarascia-Mugnozza G. E., Schlesinger W. H., Oren R. 2005. Forest response to elevated CO_2 is conserved across a broad range of productivity. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 102 (50): 18052-18056.

Norby R. J., Luo Y. Q. 2004. Evaluating ecosystem responses to rising atmospheric CO_2 and global warming in a multi-factor world. New Phytologist 162 (2): 281-293.

Norby R. J., Wullschleger S. D., Gunderson C. A., Johnson D. W., Ceulemans R. 1999. Tree responses to rising CO_2 in field experiments: implications for the future forest. Plant Cell and Environment 22 (6): 683-714.

Noss R. F. 2001. Beyond Kyoto: Forest management in a time of rapid climate change. Conservation Biology 15 (3): 578-590.

Ohlson D. W., McKinnon G. A., Hirsch K. G. 2005. A structured decision-making approach to climate change adaptation in the forest sector. Forestry Chronicle 81 (1): 97-103.

O'Neill G. A., Ukrainetz N. K., Carlson M. R., Cartwright C. V., Jaquish B. C., King J. N., Krakowski J., Russell J. H., Stoehr M. U., Xie C., Yanchuk A. D. 2008. Assisted migration to address climate change in British Columbia: recommendations for interim seed transfer standards. Technical Report 048. Victoria, B.C. Canada, B.C. Ministry of Forests and Range, Research Branch.

Oppenheimer M., O'Neill B. C., Webster M., Agrawala S. 2007. The limits of consensus. Science 317 (5844): 1505-1506.

Oreskes N. 2005. Consensus about climate change? Response. Science 308 (5724): 953-954.

Parmesan C. 2007. Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. Global Change Biology 13 (9): 1860-1872.

Peters R. L. 1990. Effects of global warming on forests. Forest Ecology and Management 35 (1-2): 13-33.

Polityka Leśna Państwa. 1997. Ministerstwo Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa, Warszawa.

Rehfeldt G. E. 1988. Ecological genetics of *Pinus contorta* from the Rocky Mountains (USA): a synthesis. Silvae Genetica 37 (3-4): 131-135.

Reich P. B., Oleksyn J. 2008. Climate warming will reduce growth and survival of Scots pine except in the far north. Ecology Letters 11 (6): 588-597.

Ryszkowski L., Kędziora A., Bałazy S. 1995. Przewidywane zmiany globalne klimatu a lasy i zadrzewienia krajobrazu rolniczego. Sylwan 139 (2): 19-32.

Sadowski M. 1996. Przewidywane zmiany klimatu i ich przyrodnicze, społeczne i polityczne konsekwencje. Sylwan 140 (5): 83-103.

Saxe H., Cannell M. G. R., Johnsen Ř., Ryan M. G., Vourlitis G. 2001. Tree and forest functioning in response to global warming. New Phytologist 149 (3): 369-399.

Saxe H., Ellsworth D. S., Heath J. 1998. Tree and forest functioning in an enriched CO_2 atmosphere. New Phytologist 139 (3): 395-436.

Skroppa T., Magnussen S. 1993. Provenance variation in shoot growth components of Norway spruce. Silvae Genetica 42 (2-3): 111-120.

Snover A. K., Binder L. W., Lopez J., Willmott E., Kay J., Howell D., Simmonds J. 2007. Preparing for Climate Change: A Guidebook for Local, Regional and State Governments. Oakland, CA, USA, In association with and published by ICLEI – Local Governments for Sustainability.

Spittlehouse D. L. 2005. Integrating climate change adaptation into forest management. Forestry Chronicle 81 (5): 691-695.

Spittlehouse D. L., Stewart R. B. 2003. Adaptation to climate change in forest management. BC Journal of Ecosystems and Management 4 (1): 1-11.

St.Clair J. B., Mandel N. L., Vance-Boland K. W. 2005. Genecology of Douglas fir in western Oregon and Washington. Annals of Botany 96 (7): 1199-1214.

Summary for Policymakers. 2007. W: Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K. B., Tignor M., Miller H. L. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press. 1-18.

Szujecki A., Zaleski J. 2005. Stan realizacji Polityki Leśnej Państwa. Polityka Leśna Państwa i Narodowy Program Leśny, materiały z konferencji. Ośrodek Edukacji Ekologicznej i Integracji Europejskiej Lasów Państwowych, Jedlnia Letnisko, 18 maja 2005 r., Centrum Informacyjne Lasów Państwowych. 23-48.

Tjoelker M. G., Oleksyn J., Reich P. B. 1998. Seedlings of five boreal tree species differ in acclimation of net photosynthesis to elevated CO_2 and temperature. Tree Physiology 18 (11): 715-726.

Vanclay J. K. 2009. Managing water use from forest plantations. Forest Ecology and Management 257 (2): 385-389.

Way D. A., Sage R. F. 2008. Elevated growth temperatures reduce the carbon gain of black spruce [*Picea mariana* (Mill.) BSP]. Global Change Biology 14 (3): 624-636.

Westerling A. L., Hidalgo H. G., Cayan D. R., Swetnam T. W. 2006. Warming and earlier spring increase western US forest wildfire activity. Science 313 (5789): 940-943.

Wullschleger S. D., Gunderson C. A., Hanson P. J., Wilson K. B., Norby R. J. 2002a. Sensitivity of stomatal and canopy conductance to elevated CO_2 concentration – interacting variables and perspectives of scale. New Phytologist 153 (3): 485-496.

Wullschleger S. D., Tschaplinski T. J., Norby R. J. 2002b. Plant water relations at elevated CO_2 – implications for water-limited environments. Plant Cell and Environment 25 (2): 319-331.

Załęski A., [red.] 2000. Leśna regionalizacja dla nasion i sadzonek w Polsce. Warszawa, Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Instytut Badawczy Leśnictwa.

Zvereva E. L., Kozlov M. V. 2006. Consequences of simultaneous elevation of carbon dioxide and temperature for plant-herbivore interactions: a metaanalysis. Global Change Biology 12 (1): 27-41.

SUMMARY

Adaptation of trees, forests and forestry to climate change

Projected increases in the concentration of atmospheric CO_2 and temperature, as well as changes in precipitation will likely affect tree physiology, growth and development either directly or indirectly. These changes will interact with various stressors and disturbances, such as wildfires, insects, and pathogens to influence the growth and health of individual trees and stands, and forest composition and structure at the level of landscapes and ecosystems.

Tree species and populations have a natural ability to adapt to changes in their environment via phenotypic plasticity, migration or evolutionary processes. However, the efficiency of these adaptive mechanisms may decrease in a rapidly changing climate. In addition to the natural adaptation of species and populations, 'adaptation' is used in the climate change literature to denote the purposeful adaptation of human systems.

In this review, we present a framework for designing adaptive strategies for forests faced with climate change. These strategies are based on a review of the scientific literature on natural and human-system adaptations. Within this framework, two related objectives are defined: (1) adaptation of decision-making process in forest management and (2) adaptation of forest ecosystems (tab.).

New approaches to forest management in light of climate change (Category I, tab.) emphasize the importance of assessing uncertainty and risk in the decision-making process. These new strategies also stress the significance of managing the process of change (i.e., adaptation or transition), rather than maintaining the current state of the system. Natural disturbances, such as wildfires and insect outbreaks, should be considered an opportunity to realign system trajectories with climatic trends. Adaptive management, including the monitoring of climate-related stresses and impacts, and frequent assessment of management effectiveness, will be essential for adapting forests to climate change.

Management strategies that focus on adapting forest ecosystems to climate change (Category II, tab.) include strategies that support the natural adaptive ability of species and populations. One strategy, conservation of species and habitats (E, tab.), is aimed at preventing loss of biodiversity, promoting natural migration of species and populations, and maintaining natural cycles of disturbances and succession. A second strategy (F, tab.) is based on increasing forest resistance and resilience to stresses, and enhancing the prompt recovery following disturbance. These options focus on preventing maladaptation of species and genotypes to projected climates.

Within each adaptive strategy, a range of management prescriptions should be based on a well-grounded understanding of the expected responses of trees and forests to projected climate change. The broad suite of current forest attributes, as well as the environmental, socioeconomic, and policy constraints, should be taken into account. The applicability of proposed adaptive strategies and options will depend on their compatibility with major forest functions – ecological and societal, commercial, or multiple-use.

We conclude that the recent emphasis on sustainable multi-functional forestry founded on the ecosystem approach will facilitate adaptation of Polish forests to future climates. In addition, the current forest ownership structure in Poland (i.e., the majority of forestlands are state-owned) may facilitate adaptation because management can be focused at the landscape level, rather than at the level of individual stands. However, the State Forests must ensure that

the principles of adaptive management are embedded in their management plans and provide sufficient flexibility to respond to expected or unexpected changes in climate. Unfortunately, much remains to be learned about the impacts of climate change on trees and forests, especially at the ecosystem level. Further cooperation between researchers and managers will be crucial for developing better management strategies for adapting forests to new climates.