

BOGDAN BRZEZIECKI

Rola matematycznego modelowania w prognozowaniu wpływu potencjalnych zmian klimatu na ekosystemy leśne

**Modelling Potential Impacts of Global Climate Change
on Forest Ecosystems**

Wstęp

Człowiek od dawna przekształca środowisko w którym żyje. Wiele obserwowanych współcześnie zjawisk wskazuje, że suma tych wpływów przekroczyła już masę krytyczną, oraz że problemy związane z oddziaływaniem społeczeństw ludzkich na środowisko kuli ziemskiej osiągnęły wymiar globalny. Przykładem są powszechne skażenia atmosfery, wód i gleb, które jakkolwiek zmienne w czasie i przestrzeni, prowadzą generalnie do pogorszenia jakości, a nawet zagrożenia życia wielu społeczności, a także wywierają negatywny wpływ na rozwój i funkcjonowanie mniej lub bardziej naturalnych ekosystemów, w tym szczególnie ekosystemów leśnych, i to często w regionach odległych od źródeł zanieczyszczeń.

Podobny, globalny charakter ma również obserwowany już od dłuższego czasu wzrost zawartości CO₂ (oraz innych tzw. gazów szklarniowych) w atmosferze, będący przede wszystkim wynikiem spalania paliw kopalnych (węgla, ropy naftowej, gazu), oraz wylesienia znacznych obszarów kuli ziemskiej. Przewiduje się, że proces ten będzie się nasilał, i że w krótkim czasie (ok. 50 lat) dojdzie do podwojenia zawartości CO₂ w atmosferze. Może to mieć doniosłe skutki, zarówno bezpośrednie (np. wpływ na tempo fotosyntezy), jak i pośrednie (przez wzrost średniej temperatury powietrza) dla funkcjonowania ekosystemów leśnych. Szacuje się, że zwiększenie wzrostu zawartości CO₂ w atmosferze spowoduje wzrost średniej temperatury powietrza o 2–4 °C, w zależności od szerokości geograficznej.

Temperatura jest jednym z najważniejszych czynników ekologicznych, wpływając — bezpośrednio i pośrednio — na wiele istotnych procesów życiowych przebiegających w

ekosystemach leśnych (5). Należą tu m.in.: fotosynteza, oddychanie, gospodarka wodna i dystrybucja asymilatów, przyrost drzew i drzewostanów, odnowienie naturalne (kiełkowanie nasion, wzrost nalotów i podrostów), zjawiska fenologiczne (kwitnienie i owocowanie drzew, przerwanie spoczynku pączków, rozpoczęcie i zakończenie wzrostu pędu, rozwój i starzenie ulistnienia), procesy glebowe (tempo rozkładu ściółki, mineralizacja materii organicznej, nityfikacja, rozwój pasożytów i fitofagów, ekstrema klimatyczne (huraganowe wiatry, okresy suszy, przymrozki wczesne i późne).

Wielość i różnorodność wzajemnych powiązań między poszczególnymi składnikami ekosystemów leśnych, a także długowieczność ich głównych komponentów — gatunków drzewiastych — powodują, że badanie możliwych konsekwencji wzrostu temperatury przy użyciu metody kontrolowanych eksperymentów jest mocno ograniczone, na rzecz przede wszystkim matematycznego modelowania i symulacji komputerowej. Te ostatnie stają się niezastąpionym narzędziem zwłaszcza w tych przypadkach, gdy chodzi o prognozę możliwych skutków zmian klimatu w większych skalach przestrzennych (regionalnych i ponadregionalnych) oraz czasowych (objętych horyzontem średnio- i długoterminowego planowania hodowlanego). Niektóre problemy, jakie pojawiają się przy próbie modelowania wpływu klimatu na lasy, zostaną omówione na przykładzie dwóch modeli. Pierwszy z nich umożliwi symulację przestrzennego rozmieszczenia leśnych zespołów reprezentujących potencjalną roślinność naturalną w Szwajcarii (4). Drugi model pozwala na analizę wpływu temperatury na zdolność konkurencyjną głównych gatunków drzew leśnych występujących w wybranych makroregionach Polski (16).

Symulowana mapa potencjalnej roślinności naturalnej Szwajcarii

Model "roślinność — siedlisko"

Dzisiejszą potencjalną roślinność naturalną definiuje się w fitosocjologii jako "stan graniczny tendencji sukcesyjnych roślinności zgodnych z obecnymi warunkami środowiska fizyczno-geograficznego" (12, por. także 17). Roślinność naturalna jest jednym z najważniejszych, syntetycznych parametrów wykorzystywanych przy ocenie zmian ekologicznego potencjału (zdolności produkcyjnej, żyzności) siedliska, będących rezultatem zmian w globalnych warunkach środowiska przyrodniczego. Z punktu widzenia hodowli lasu, najpełniejszym i najbardziej wiarygodnym opisem warunków siedliskowych jest określenie naturalnego zespołu leśnego, który mógłby występować w tych warunkach (11). W Szwajcarii, typ naturalnego zespołu leśnego pokrywa się z typem siedliskowym lasu.

Ze względu na silne przekształcenie wielu naturalnych fitocenoz leśnych, oraz duży udział siedlisk zniekształconych i zdegradowanych, interpretacja i kartowanie potencjalnej roślinności naturalnej w terenie jest często trudnym zadaniem. Znaczną pomoc stanowią tu resztki lasów o naturalnym lub półnaturalnym charakterze, które zachowały się jeszcze tu i ówdzie w krajobrazie współczesnej Europy. Z reguły zostały one intensywnie przebadane przez fitosocjologów i leśników, co pozwoliło na zgromadzenie bardzo bogatego materiału empirycznego, przede wszystkim w postaci zdjęć fitosocjologicznych. Typowe zdjęcie fitosocjologiczne zawiera, oprócz części florystycznej, także opis warunków występowania danego zespołu w terenie. Dane te można wykorzystać do skonstruowania modelu "roślin-

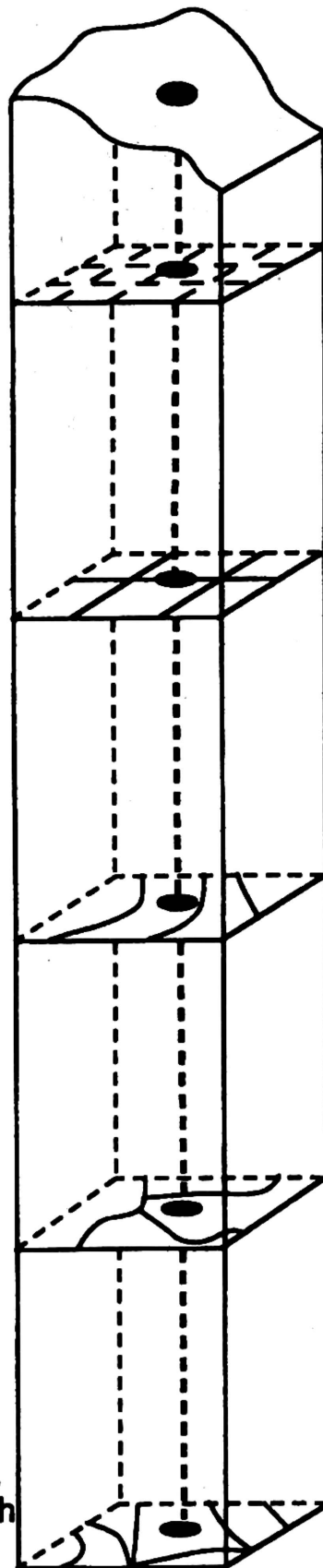
**Numeryczny model terenu
(wysokość, wystawa,
nachylenie zbocza),
1,1 mln punktów danych,
raster 250m**

**Symulowana mapa
temperatury powietrza,
62000 punktów danych,
raster 1000m**

**Numeryczna mapa
opadów, skala 1:400000**

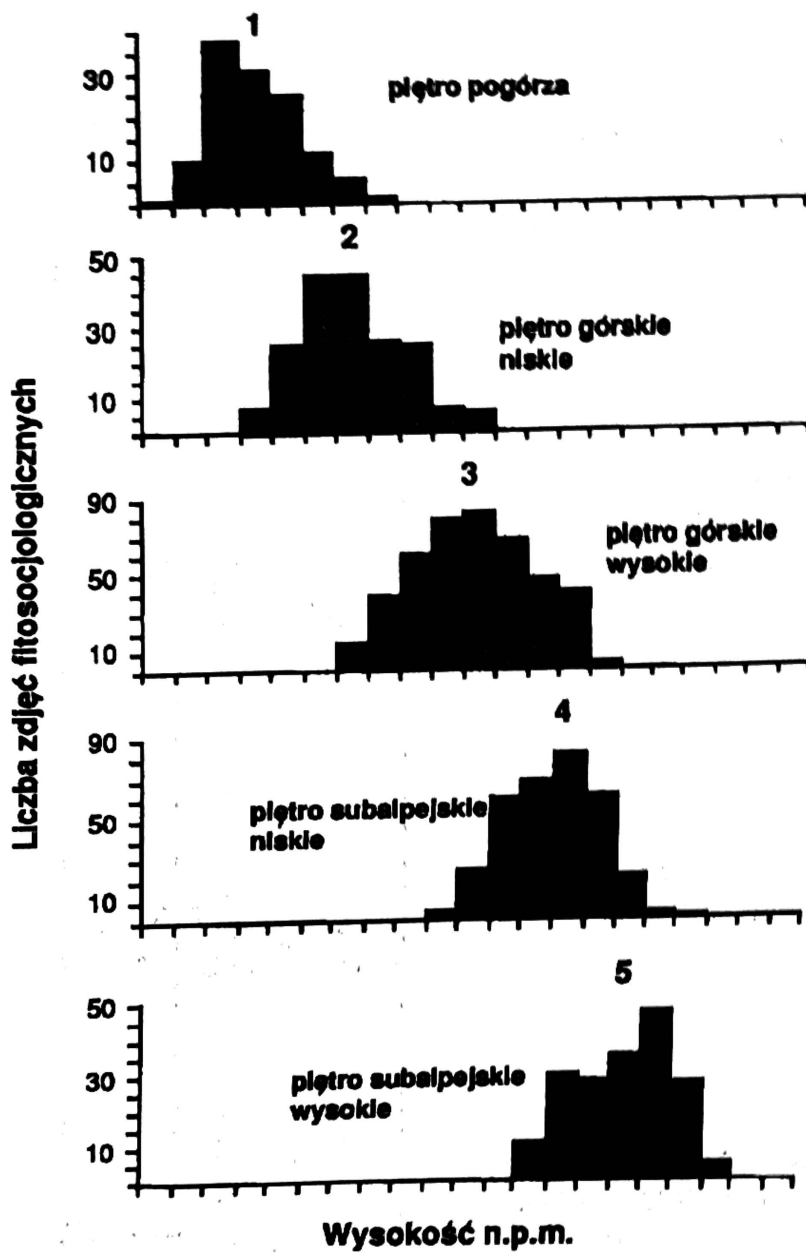
**Mapa przydatności gleb
(fizyczne właściwości
gleby), skala 1:200000**

**Mapa pH gleby, otrzymana
na podstawie interpolacji ok.
10000 punktów pomiarowych**

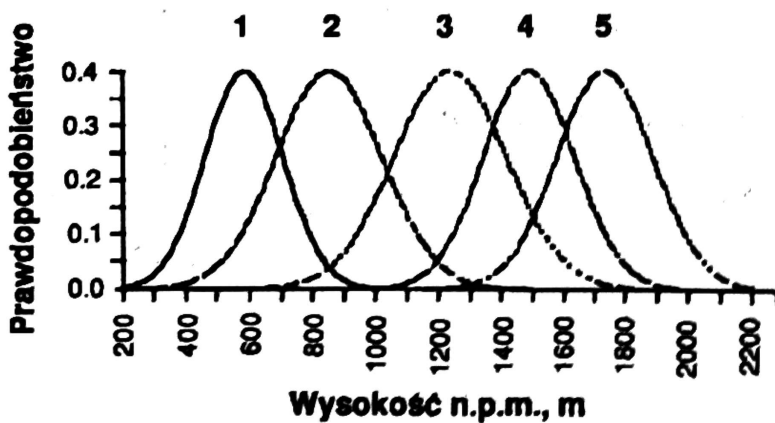


RYC. 1. Numeryczne mapy czynników siedliskowych, wykorzystane w modelu "roślinność-siedlisko" w charakterze zmiennych niezależnych

Rozkłady empiryczne



Krzywe prawdopodobieństwa



RYC. 2. Empiryczne rozkłady liczby zdjęć fitosocjologicznych dla zespołów przewodnich reprezentujących główne piętra klimatyczno-roślinne w Alpach Północnych, oraz standaryzowane krzywe prawdopodobieństwa występowania zespołów wzdłuż gradientu wysokości n.p.m.

ność-siedlisko" opisującego zależność między występowaniem różnych typów leśnej potencjalnej roślinności naturalnej a warunkami środowiska.

Model taki został skonstruowany dla warunków szwajcarskich (4). Zmienną zależną zdefiniowano jako "typ naturalnego zespołu leśnego". Syntetyczny przegląd typów lasów występujących w Szwajcarii, i reprezentujących potencjalną roślinność naturalną, zawiera opracowanie, którego autorami są Ellenberg i Klötzli (7). Wyróżnili oni ogółem 71 typów zbiorowisk leśnych, ujętych w randze asocjacji lub subasocjacji, reprezentują one całą zmienność roślinności lasów Szwajcarii w warunkach naturalnych, tj. przy założeniu wyłączenia wpływów człowieka.

W charakterze zmiennych niezależnych uwzględniono w modelu te czynniki siedliskowe, dla których zgromadzono do tej pory odpowiednie dane w komputerowym banku danych, konstruowanym na podstawie technologii GIS (System Informacji Przestrzennej) i obejmującym swym zasięgiem obszar całego kraju. Aktualnie w banku znajdują się dane reprezentujące 3 grupy czynników środowiska (ryc. 1). Są to: czynniki topograficzne (wysokość n.p.m., rodzaj wystawy, nachylenie zbocza), czynniki klimatyczne (temperatura, opady) i czynniki glebowe (właściwości fizyczne gleby, pH wierzchniej warstwy gleby).

Z matematyczno-statystycznego punktu widzenia, zastosowany model stanowi kombinację tzw. "macierzy przyporządkowania" (zmienne o charakterze dyskretnym) i modelu Bayesa (zmienne o charakterze ciągłym). Macierz przyporządkowania ma postać tablicy zero-jedynkowej i podaje dla każdego zespołu zakres występowania, z uwzględnieniem kategorii zmiennych niezależnych. W modelu Bayesa punktem wyjścia są natomiast empiryczne rozkłady częstości występowania zespołów wzdłuż gradientów czynników środowiska. Za pomocą odpowiedniej procedury statystycznej empiryczne rozkłady częstości są zastępowane przez standaryzowane krzywe, pokazujące jak zmienia się prawdopodobieństwo występowania zespołu w miarę zmiany gradientu czynnika ekologicznego (ryc. 2).

Eksperyment symulacyjny

Po "sprzężeniu" z bazą danych ekologicznych zapisanych w Systemie Informacji Geograficznej (ryc. 1), model "roślinność-środowisko" posłużył do skonstruowania numerycznej, symulowanej mapy potencjalnej roślinności leśnej Szwajcarii. Na rycinie 3 przedstawiono przykładowo przestrzenne rozmieszczenie kilku wybranych typów roślinności, uzyskane za pomocą uproszczonej wersji modelu "roślinność-środowisko", symulującej występowanie zespołów reprezentujących roślinność zonalną, tzn. taką, która jest wyrazem ogólnych warunków klimatycznych panujących w określonym regionie oraz dominującego typu gleb. Siedliska o charakterze skrajnym (znajdujące się pod trwałym wpływem wody gruntowej, tereny zalewowe, bardzo strome i skaliste zbocza itp.) zostały pominięte. Model pozwala na symulację potencjalnej roślinności naturalnej niezależnie od aktualnej formy użytkowania terenu, z wyjątkiem obszarów zurbanizowanych, zbiorników wodnych i jezior oraz terenów położonych powyżej górnej granicy lasu. Mapy przedstawione na ryc. 3 ilustrują przestrzenne rozmieszczenie typów roślinności zonalnej odpowiadające dzisiejszym warunkom klimatycznym. Za pomocą modelu "roślinność-siedlisko" otrzymano również mapy przedstawiające potencjalną roślinność naturalną Szwajcarii w warunkach, które przewidują wzrost przeciętnej temperatury powietrza (średnio o 2,4°C) (ryc. 4). Porównując przestrzenne rozmieszczenie wybranych typów lasów, przedstawione na ryci-

Lasy dębowo-grabowe



Lasy jodłowo-bukowe



Lasy świerkowe



RYC. 3. Przestrzenne, symulowane rozmieszczenie wybranych typów potencjalnej roślinności naturalnej Szwajcarii, odpowiadające współczesnym warunkom klimatycznym

nach 3 i 4, można stwierdzić bardzo istotny wpływ założonego wzrostu temperatury na rozmieszczenie i przestrzenny zasięg poszczególnych typów lasów. Szczególnie duże zmiany można zaobserwować w przypadku lasów dębowo-grabowych (Carpinion), stanowiących roślinność klimaksową piętra pogórza. W obecnych warunkach klimatycznych, występowanie tych lasów jest ograniczone w zasadzie do najcieplejszych i najsuchszych obszarów, położonych na północ od Alp i znajdujących się pod wpływem klimatu oceanicznego (okolice Jeziora Genewskiego). W wyniku wzrostu temperatury, lasy dębowo-grabowe rozprzestrzeniają się na rozległym obszarze Równiny Środkowoszwajcarskiej (Mittelland), wypierając lasy bukowe, które znajdują się tam obecnie. Podobne "przesunięcia" mają także miejsce w przypadku lasów jodłowo-bukowych (Abieti-Fagion) oraz świerkowych (Vaccinio-Piceion). W obu tych przypadkach straty terytorialne są jednak z reguły większe niż zyski. Przykładowo, lasy bukowo-jodłowe w Jurze zanikają prawie całkowicie, a i w Alpach Północnych zmniejszają wyraźnie swój zasięg występowania.

Generalnie, roślinność zonalna Szwajcarii okazała się być bardzo wrażliwa na zmiany klimatu. Wynika to stąd, że amplitudy ekologiczne zespołów przewodnich, reprezentujących poszczególne piętra wysokościowo-klimatyczne, są zdefiniowane raczej dosyć wąsko, dlatego nawet stosunkowo mała zmiana temperatury wystarcza, żeby spowodować zastąpienie jednego zespołu przez inny, zajmujący na gradiencie temperatury nieco cieplejsze położenie. To, czy dany typ roślinności zyskuje na znaczeniu, czy też traci, w dużym stopniu zależy od charakterystyki hipsometrycznej terenu. Zespoły, które zajmują pośrednie położenia na gradiencie wysokościowo-klimatycznym, straty ponoszone w niższych, cieplejszych położeniach, mogą kompensować kosztem zespołów zajmujących aktualnie wyższe i chłodniejsze położenia. Jest jednak oczywiste, że im wyżej występuje dany zespół, tym mniejsza szansa na pełną "rekompensatę" strat terytorialnych ponoszonych na dolnej granicy zasięgu.

Oceniając wartość poznawczą i praktyczną tych wyników należałoby wziąć pod uwagę kilka czynników. Po pierwsze, prognozy dotyczące kierunkowej zmiany klimatu są w dalszym ciągu obarczone znacznym stopniem niepewności. Można mieć tylko nadzieję, że wiarygodność tych prognoz istotnie wzrośnie w najbliższym czasie. Po drugie, ważnym czynnikiem jest jakość modelu "roślinność-siedlisko". Aby ocenić stopień "dobroci" modelu i dokładność mapy uzyskiwanej za jego pomocą, przeprowadzono wiele testów, porównując wyniki symulacji z mapami sporządzonymi metodami tradycyjnymi, tj. przez kartowanie w terenie. Wyniki sugerowały blisko 60% zgodności na "poziomie" zespołu oraz około 80% na "poziomie" piętra roślinno-klimatycznego (4). Zważywszy na fakt, że i mapy terenowe na pewno nie są bez błędów, uzyskane liczby wydają się być niezłym wynikiem, ale niewątpliwie zarówno w konstrukcji samego modelu jak i w dokładności oraz rozdzielczości danych potrzebnych na jego "wejściu" kryją się jeszcze znaczne rezerwy.

Do słabych stron modelu "roślinność-środowisko" należy to, że umożliwia on jedynie symulację stanów "równowagi". Jest to jednak ściśle związane z samą koncepcją potencjalnej roślinności naturalnej, która określa najbardziej prawdopodobny kierunek rozwoju szaty roślinnej, przy założeniu wyłączenia wpływu człowieka; nic lub niewiele mówi natomiast o tym, jak długi okres jest potrzebny do osiągnięcia stanu równowagi, jakimi drogami mógłby przebiegać rozwój różnych aktualnie istniejących form roślinności itp.

Lasy dębowo-grabowe



Lasy jodłowo-bukowe



Lasy świerkowe



RYC. 4. Przestrzenne rozmieszczenie wybranych typów potencjalnej roślinności naturalnej Szwajcarii (ryc. 3), w warunkach zmienionego klimatu (wzrost średniej temperatury powietrza o ok. 2,4°C)

Do najważniejszych zalet, poza tymi o charakterze mniej lub bardziej technicznym, należy niewątpliwie możliwość symulowania potencjalnej roślinności naturalnej (a tym samym syntetycznego określenia potencjału przyrodniczego i produkcyjnego siedliska), dla dowolnego punktu w przestrzeni i w czasie, przy założeniu, że ramowe warunki siedliskowe (klimat, topografia, gleby) są znane lub zostały określone w ramach pewnego scenariusza zmian środowiska.

Temperatura a zdolność konkurencyjna gatunków drzew

Wymagania klimatyczne gatunków drzew

Ocenę wpływu potencjalnych zmian klimatu na ekosystemy leśne przeprowadza się w ostatnim czasie na "poziomie" populacyjnym (gatunków drzew). Taka ocena wymaga spełnienia przynajmniej dwóch warunków. Po pierwsze, należy określić i możliwie skwantyfikować wymagania drzew w stosunku do różnych czynników klimatycznych (np. wymagania względem ciepła). Po drugie, należy sformułować model ekologiczny pozwalający analizować wpływ zmian czynnika ekologicznego (np. temperatury) na wybrane parametry opisujące dynamikę populacji drzew.

Określenie wymagań cieplnych gatunków drzew nie jest sprawą prostą, jakkolwiek w ekologii i hodowli lasu próby w tym kierunku były podejmowane od dawna. Przykładowo. Puchalski (14) przedstawia w syntetyczny sposób wymagania cieplne gatunków drzewiastych za pomocą tzw. szeregów ekologicznych (opracowanych oddzielnie dla klimatu nizin i gór), wyróżniając 3 grupy gatunków o dużych, średnich i małych wymaganiach.

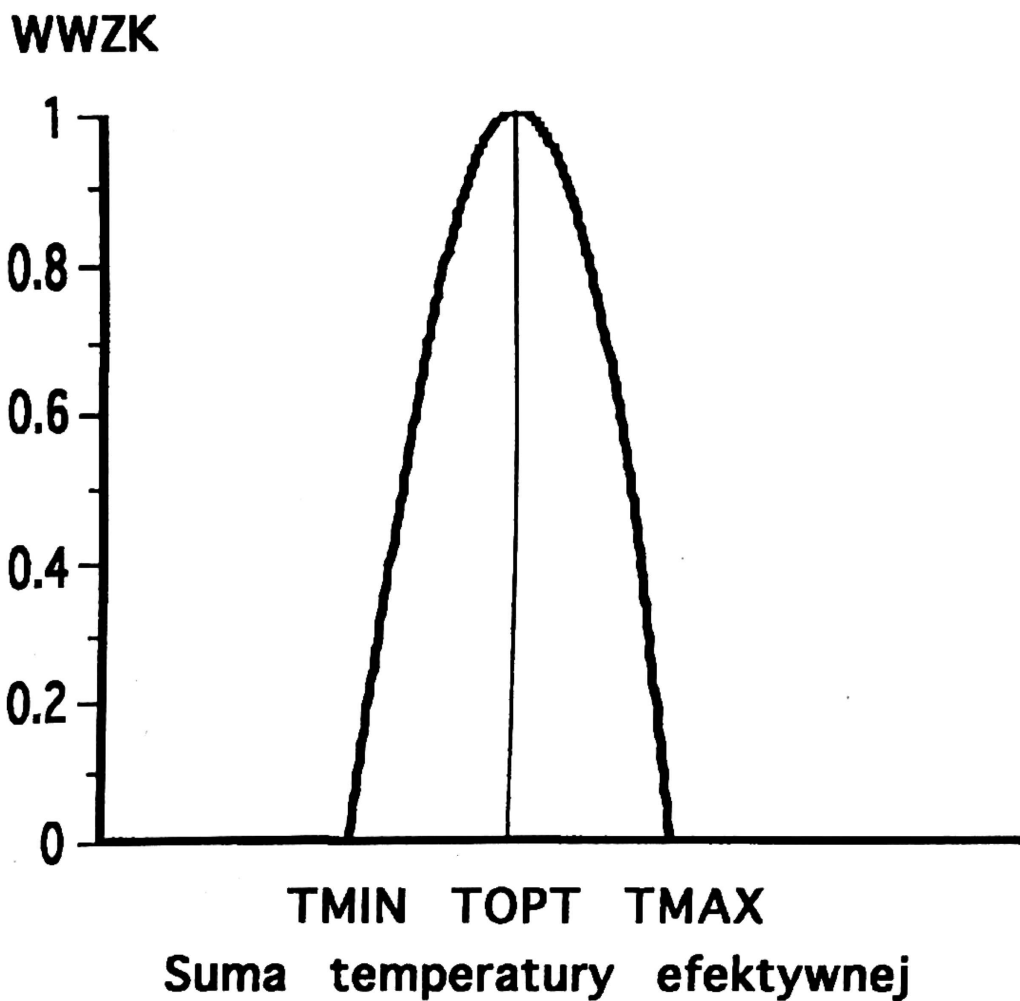
Podobne schematy klasyfikacyjne można w literaturze z zakresu ekologii i hodowli lasu spotkać stosunkowo często. Warto tu wspomnieć np. opracowanie Leibundguta (11), oraz koncepcję ekologicznych liczb wskaźnikowych opracowaną przez Ellenberga (6) i przystosowaną do warunków polskich przez Zarzyckiego (18). Takie schematy są jednak z reguły zbyt ogólne i za mało sformalizowane, aby mogły znaleźć bezpośrednie zastosowanie w modelowaniu wpływu klimatu na lasy.

Model "zdolność konkurencyjna drzew — temperatura efektywna"

W licznych pracach poświęconych problematyce wpływu klimatu na dynamikę populacji drzew leśnych, jakie pojawiły się w ostatnich kilku latach (np. 15), wykorzystuje się najczęściej zależność zaproponowaną przez Botkina i in. (2). Postulują oni, żeby za miarę wpływu temperatury na tempo wzrostu i zdolność konkurencyjną gatunków drzewiastych przyjąć tzw. sumę temperatury efektywnej.

Konkurencję można zdefiniować jako "dążenie sąsiadujących roślin do zawładnięcia tę samą częścią (ograniczonych) zasobów środowiska (światła, składników pokarmowych, wody, przestrzeni)" (8). W przypadku drzew, zdolność konkurencyjną określa wiele przystosowań i procesów, z których wiele bezpośrednio lub pośrednio zależy od temperatury. Mechanizmy konkurencji u drzew obejmują m.in. efektywność procesów fizjologicznych (fotosynteza, oddychanie, transpiracja), zdolność przyswajania składników pokarmowych i pobierania wody, liczbę nasion i częstotliwość obradzania, zdolność znoszenia

$$WWZK = \frac{4(STE - T_{MIN})(T_{MAX} - STE)}{(T_{MAX} - T_{MIN})^2}$$



RYC. 5. Wzór oraz krzywa przedstawiająca wpływ sumy temperatury efektywnej (STE) na tempo wzrostu i zdolność konkurencyjną gatunków drzewiastych (Botkin i in. 1972)

ocienienia i początkowe tempo wzrostu na wysokość, odporność na ataki ze strony pasożytniczych grzybów i owadów.

Temperaturę efektywną definiuje się jako sumę odchyień średniej temperatury dni z okresu, w którym przekracza ona pewną, umowną wartość progową (najczęściej jest to 5°C). Zgodnie z propozycją Botkina i in. (2), dla każdego gatunku można znaleźć taką sumę temperatury efektywnej (TOPT), przy której jego siła konkurencyjna jest największa, a temperatura nie pełni roli czynnika ograniczającego wzrost i inne procesy życiowe (ryc. 5). Odchylenia zarówno na "plus" jak i na "minus" od tej optymalnej wartości prowadzą do pogorszenia warunków wzrostu i obniżenia siły konkurencyjnej drzew danego gatunku, mierzonej za pomocą względnego wskaźnika zdolności konkurencyjnej (WWZK), wyskalowanego od 0 do 1.

Jak wynika z przedstawionego równania, praktyczne wykorzystanie modelu Botkina wymaga określenia dwóch parametrów: minimalnej (TMIN) i maksymalnej (TMAX) sumy temperatury efektywnej, w której możliwy jest jeszcze (w warunkach naturalnej konkurencji) wzrost i rozwój drzew określonego gatunku. Parametry te określa się najczęściej na podstawie zasięgów geograficznych gatunków, porównując je z mapami przedstawiającymi przestrzenną zmienność charakterystyk klimatu. Sumą temperatury efektywnej (STE) można obliczyć za pomocą przybliżonego wzoru na podstawie średniej temperatury najzimniejszego (styczeń) i najcieplejszego (lipiec) miesiąca roku. Korzystając z tej metody, Prentice i Helmisaari (13) określili minimalną i maksymalną sumę temperatury efektywnej dla szeregu gatunków, z których większość odgrywa także ważną rolę w lasach Polski. W tabeli zostały one uszeregowane, poczynając od tych gatunków, dla których optima wypadają w regionach o stosunkowo niskiej sumie temperatur efektywnych, i kończąc na gatunkach o stosunkowo wysokich wymaganiach cieplnych.

Eksperyment symulacyjny

Na podstawie danych przedstawionych w tabeli przeprowadzono prosty eksperyment, którego celem było określenie wpływu zwiększonej temperatury na zdolność konkurencyjną drzew w warunkach klimatu Polski. Wykorzystano do tego celu podział kraju na strefy i makroregiony ekoklimatyczne, opracowany przez Tramplerę i in. (16). W pierwszej kolejności określono dla każdego makroregionu sumę temperatury efektywnej na podstawie średniej temperatury styczeń i lipca, obliczonej dla okresu 1931–1960 (16). Dla makroregionów nizinnych (do 400 m n.p.m.) wartości sumy temperatury efektywnej mieszczą się w granicach od ok. 1600 do ok. 1850 stopni. Dla porównania, zakres występowania gatunków drzew uwzględnionych w tabeli obejmuje przedział od 300 do 4600 stopni.

W obliczeniach, dla większej przejrzystości, wyróżniono pięć grup gatunków, uszeregowanych zgodnie z rosnącymi wymaganiami względem sumy ciepła. Krzywe zamieszczone na rycinie 6 przedstawiają wyniki dla dwóch skrajnych pod względem sumy temperatury efektywnej makroregionów ekoklimatycznych: Wyżyn Dolnośląskich (STE=1816°C) oraz Pojezierza Mazurskiego (STE-1598°C). Na osi X-ów odłożono procentowy wzrost sumy temperatury efektywnej, o 5, 10, 15, 20 i 40% w stosunku do warunków obecnych, reprezentowanych przez punkt przecięcia osi X-ów przez oś Y-ów. Przyrost temperatury efektywnej o 15% odpowiada w przybliżeniu wzrostowi średniej temperatury roku o 2°C, przyrost o 40% — wzrostowi średniej temperatury o ok. 4°C.

W przypadku Wyżyn Dolnośląskich, obecne warunki klimatyczne sprzyjają w największym stopniu gatunkom grupy 3 i 2, w mniejszym stopniu grupie 4 i w najmniejszym grupie 1 (zbyt "duża" suma temperatury efektywnej) oraz 5 (suma temperatury efektywnej za "mała"). W przypadku Pojezierza Mazurskiego, kolejność grup gatunków jest nieco inna; obecne warunki sprzyjają w największym stopniu 2 grupie gatunków, nieco mniej grupie 1, jeszcze mniej grupie 3 i w najmniejszym stopniu grupie 4 i 5, dla których współczesne warunki są zbyt "chłodne".

W wyniku kierunkowego wzrostu sumy temperatury efektywnej, analizowane grupy gatunków wykazują podobne trendy w obu makroregionach, jakkolwiek przebieg reakcji gatunków na wzrost temperatury jest nieco inny, ze względu na różnice w sytuacji

TABELA
Zasięgi klimatyczne wybranych gatunków drzew i krzewów (Prentice i Helmisaari 1991)

Gatunek	TOPT °C	TMIN °C	TMAX °C
<i>Betula pubescens</i>	1200	300	2100
<i>Picea abies</i>	1250	600	1900
<i>Betula pendula</i>	1350	500	2200
<i>Sorbus aucuparia</i>	1350	300	2400
<i>Pinus sylvestris</i>	1450	500	2400
<i>Juniperus communis</i>	1550	300	2800
<i>Alnus incana</i>	1600	400	2800
<i>Acer platanoides</i>	1875	1150	2600
<i>Ulmus glabra</i>	2075	1150	3000
<i>Fraxinus excelsior</i>	2150	1300	3000
<i>Tilia cordata</i>	2225	1050	3400
<i>Corylus avellana</i>	2350	1100	3600
<i>Fagus sylvatica</i>	2375	1550	3200
<i>Carpinus betulus</i>	2375	1550	3200
<i>Populus tremula</i>	2400	400	4400
<i>Quercus robur</i>	2600	1200	4000
<i>Taxus baccata</i>	2725	1450	4000
<i>Quercus petraea</i>	2750	1500	4000
<i>Alnus glutinosa</i>	2800	1000	4600

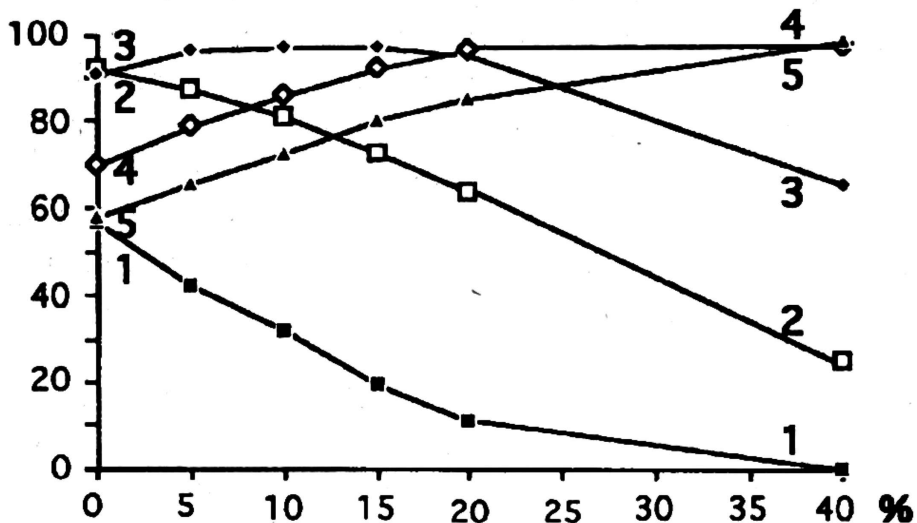
wyjściowej. Z pięciu analizowanych grup, dwie, reprezentowane m.in. przez *Picea abies* i *Pinus sylvestris* (grupa 1 i 2), wykazują pogorszenie warunków rozwoju w wyniku wzrostu sumy temperatury efektywnej. Taka sytuacja jest wynikiem tego, że większość gatunków z tych dwóch grup reprezentuje borealno-kontynentalny typ zasięgu i znajduje optymalne (pod względem ilości ciepła w sezonie wegetacyjnym) warunki do rozwoju w regionach położonych na północny wschód od Polski. W przypadku 1 grupy wzrost temperatury o 4°C powoduje w obu makroregionach spadek względnego wskaźnika zdolności konkurencyjnej prawie do zera, co oznacza powstanie warunków, jakie występują aktualnie na południowej (płd.-zach.) granicy występowania tych gatunków.

Grupa 3, zawierająca gatunki o pośrednich wymaganiach względem sumy ciepła (klon, wiąz gr., jesion, lipa dr.), reaguje początkowo pozytywnie na wzrost sumy temperatury efektywnej, następnie zaś, po przekroczeniu pewnej granicy, wykazuje objawy regresu. Generalnie, reakcja tej grupy gatunków na zmiany temperatury jest najslabsza, co wynika stąd, że w warunkach przejściowego klimatu Polski znajdują się one blisko optimum swoich wymagań termicznych.

Dwie pozostałe grupy gatunków (m.in. buk, grab, oba gatunki dębów), wyraźnie korzystają ze zwiększonej sumy ciepła. Dla wielu z nich aktualne warunki klimatyczne Polski są zbyt "chłodne", czego wyrazem są m.in. północno-wschodnie granice zasięgu przebiegające na

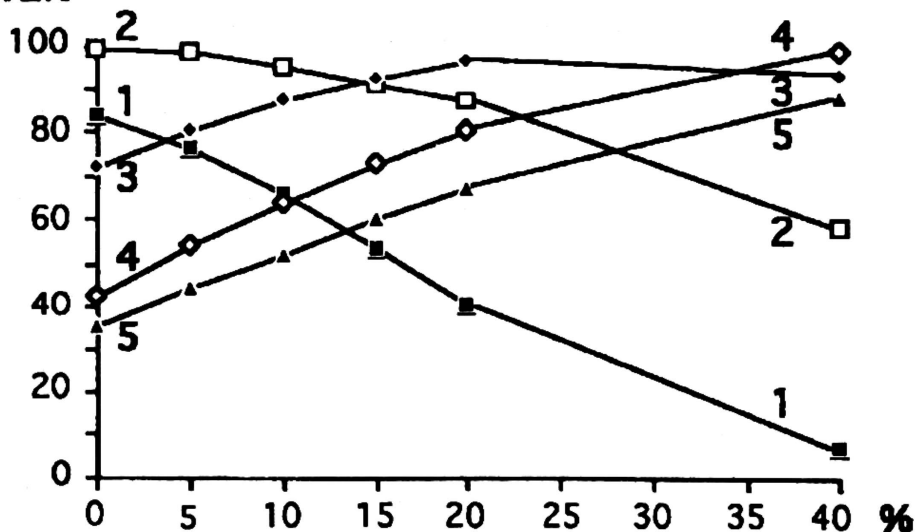
Wyżyny Dolnośląskie ($STE_0=1816^\circ\text{C}$)

WWZK



Pojezierze Mazurskie ($STE_0=1598^\circ\text{C}$)

WWZK



Wzrost sumy temperatury efektywnej

RYC. 6. Zmiany względnego wskaźnika zdolności konkurencyjnej gatunków (WWZK) jako wynik wzrostu sumy temperatury efektywnej. Grupy gatunków: 1: *Picea abies*, *Betula pendula*, *B. pubescens*, *Sorbus aucuparia*; 2: *Pinus sylvestris*, *Juniperus communis*, *Alnus incana*; 3: *Acer platanoides*, *Ulmus glabra*, *Fraxinus excelsior*, *Tilia cordata*; 4: *Fagus sylvatica*, *Carpinus betulus*, *Populus tremula*, *Corylus avellana*; 5: *Quercus robur*, *Q. petraea*, *Alnus glutinosa*, *Taxus baccata*

terytorium naszego kraju, bądź w pobliżu jego wschodniej granicy (np. buk, cis, grab, dąb bezszypułkowy).

Wyniki prostego eksperymentu symulacyjnego przedstawione na ryc. 6 mają przede wszystkim ilustracyjny charakter. Sugerują one tendencje, jakich można oczekiwać na "poziomie" makroregionów ekoklimatycznych dla bardzo ogólnie zdefiniowanej "zdolności konkurencyjnej" gatunków drzewiastych. Reakcja gatunków na wzrost temperatury będzie prawdopodobnie zależec od wielu czynników: miejscowych warunków glebowo-siedliskowych (w tym głównie od bilansu wodnego!), topograficznych, składu gatunkowego, struktury i fazy rozwojowej drzewostanu, itd. itp. Uwzględnienie tych wszystkich okoliczności, a także interakcji temperatury z innymi czynnikami wpływającymi na wzrost i rozwój drzew i drzewostanów, wymaga skonstruowania ogólnego i całościowego modelu dynamiki ekosystemu leśnego. W świetle dawnych oraz nowych zagrożeń lasów, a także wzrostu stopnia niepewności i ryzyka związanego z globalnymi zmianami środowiska przyrodniczego, potrzeba skonstruowania takiego modelu staje się coraz bardziej nagląca. Model tego rodzaju mógłby stanowić podstawowe narzędzie planowania hodowlanego, przy którym uwzględniono by nie tylko doświadczenia z przeszłości, ale i najbardziej prawdopodobne prognozy przyszłego stanu środowiska (1,3).

Podsumowanie i wnioski

Prognozowanie reakcji ekosystemów leśnych na zmiany klimatyczne stanowi "dynamiczną" wersję klasycznego, od dawna znanego problemu zależności między roślinnością i klimatem, będących przedmiotem badań takich dyscyplin jak: ekofizjologia i geografia roślin, paleobotanika, dendroklimatologia. Zastosowanie modelowania komputerowego wymusza konieczność uogólnienia i syntezy zgromadzonej dotychczas wiedzy na temat zależności między roślinami i klimatem, ujawnia luki i sprzeczności w istniejących danych, pozwala także lepiej zrozumieć i opisać dynamikę ekosystemów w zmieniających się warunkach środowiska.

Oba przedstawione tutaj parametry opisujące ekosystemy leśne i ich elementy składowe, tj. zarówno potencjalna roślinność naturalna, jak i zdolność konkurencyjna gatunków drzewiastych, mają istotne znaczenie z punktu widzenia gospodarki leśnej i hodowli lasu. Pierwsza z nich jest najpełniejszym wyrazem ekologicznego potencjału siedliska, jego produktywności, przydatności w hodowli różnych gatunków itp. (10). Drugi parametr jest niemniej ważny; jego znajomość jest niezbędna w planowaniu hodowlanym przy doborze składu gatunkowego upraw i odnowień, docelowego składu gatunkowego drzewostanu, określaniu i charakteru i intensywności prac pielęgnacyjnych, form zmieszania, struktury przestrzennej i pionowej drzewostanów, w projektach przebudowy i przywracania naturalnego charakteru leśnych fitocenoz itp. Na oba wspomniane parametry, prognozowane zmiany warunków makroklimatycznych mogą mieć bardzo istotny wpływ, na co wskazują wyniki przeprowadzonych eksperymentów symulacyjnych.

Ze względu na różnorodność komponentów i wielokierunkowość ich wzajemnych powiązań (w tym obecność wielu sprzężeń zwrotnych o charakterze dodatnim i ujemnym), oceny wpływu klimatu na ekosystemy leśne nie można jednak zawęzić jedynie do wybranych procesów, bo może prowadzić to do błędnych wniosków. Stąd wynika potrzeba skonstruo-

wania całościowego i ogólnego modelu opisującego funkcjonowanie ekosystemów leśnych w różnych (zmiennych zarówno w przestrzeni jak i w czasie) warunkach środowiska przyrodniczego. Przykłady takich modeli można znaleźć w literaturze z zakresu ekologii i hodowli lasu. O niektórych problemach związanych z przystosowaniem i kalibracją takiego modelu w warunkach lasów Polski traktuje bardziej szczegółowo inne opracowanie (3).

Znalezienie jednego "najlepszego" modelu, wyczerpującego wszystkie możliwe reakcje ekosystemów leśnych na zmiany klimatu, wydaje się mało realne. W tej sytuacji należałoby raczej korzystać jednocześnie z wielu modeli, opartych na różnych założeniach, i na ich podstawie określić najbardziej prawdopodobne konsekwencje potencjalnych zmian klimatu dla struktury i funkcjonowania ekosystemów leśnych. Ponadto, przy prognozowaniu wpływu zmian klimatu na ekosystemy leśne i opracowywaniu wniosków dla praktyki planowania hodowlanego, obok matematycznego modelowania ważną rolę powinny odgrywać także badania eksperymentalne, oraz wieloletnie obserwacje na stałych powierzchniach badawczych, znajdujących się w warunkach możliwie jak najmniej zakłóconych bezpośrednim oddziaływaniem człowieka.

*Eidgenössische Forschungsanstalt
für Wald, Schnee und Landschaft,
Birmensdorf, Szwajcaria*

Literatura

1. **Bernadzki E.:** Aktualne problemy planowania hodowlanego. Sympozjum "Urządzenie lasu — Stan i perspektywy rozwoju". Instytut Badawczy Leśnictwa. Komitet Nauk Leśnych PAN. Warszawa. 1992.
2. **Botkin D.B., Janak J.F., Wallis J.R.:** Some consequences of a computer model of forest growth. *J. Ecol.* 1972 Vol. 60.
3. **Brzeziecki B.:** Ekologiczny model wzrostu lasu: niektóre problemy metodyczne i kalibracyjne. *Sylwan* 1991 R. 135 nr 9.
4. **Brzezicki B., Kienast F., Wildi O.:** A simulated map of the potential natural forest vegetation of Switzerland. *Journal of Vegetation Science* 1993. Vol. 4.
5. **Czarnowski M.S.:** Zarys ekologii roślin lądowych. Wyd. II. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa. 1989.
6. **Ellenberg H.:** Zeigerwerte der Gefässpflanzen Mitteleuropas. *Scripta Geobot.* (Göttingen) 1974 Vol. 9.
7. **Ellenberg, H., Klötzli, F.:** Waldgesellschaften und Waldstandorte der Schweiz. *Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw.* 1972 Vol. 48.
8. **Grime, J.P.:** Evidence for the existence of three primary strategies in plants and its relevance to ecological and evolutionary theory. *American Naturalist.* 1977 Vol. 111.
9. **Kowalski M.:** Climate — a changing component of forest site. *Folia Forestalia Polonica. Series A — Forestry.* 1991 No 33.

10. **Leibundgut H.:** Die waldbauliche Behandlung wichtiger Waldgesellschaften der Schweiz. Mitteilungen Eidg. Anstalt für das Forst. Versuchswesen. 1983 Bd. 59 Heft 1.
11. **Leibundgut H.:** Unsere Waldbäume: Eigenschaften und Leben. 2. Aufl. Verlag P. Haupt. Bern und Stuttgart. 1991.
12. **Matuszkiewicz W.:** Regionalizacja geobotaniczna Polski (Aneks). W: Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski na podstawach ekologiczno-fizjograficznych. PWRiL. Warszawa. 1990.
13. **Prentice, I.C., Helmisaari H.:** Silvics of north European trees: compilation, comparisons and implications for forest succession modelling. For. Ecol. Manage. 1991 Vol. 42.
14. **Puchalski T.:** Rębnie w gospodarstwie leśnym. PWRiL. Warszawa. 1972.
15. **Solomon A.M.:** Transient response of forest to CO₂-induced climate change: Simulation experiments in eastern North America. Oecologia 1986 Vol. 68.
16. **Trampler T., Kliczkowska A., Dmyterko E., Sierpińska A.:** Regionalizacja przyrodniczo-leśna Polski na podstawach ekologiczno-fizjograficznych. PWRiL. Warszawa. 1990.
17. **Tüxen R.:** Die heutige potentielle natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung. Angew. Pflanzensoziol. (Stolzenau). 1956 Vol. 13.
18. **Zarzycki, K.:** Ekologiczne liczby wskaźnikowe roślin Polski. IB PAN. Kraków. 1984.

Summary

In the studies of the potential impacts of a global climate change on forest ecosystems, mathematical modelling and computer simulation play an important role. This because of the high complexity of forest ecosystems, the long life expectancy of trees, and the time lags in forest responses, which all make difficult the use of more traditional methods like, for example, controlled experiments. Particularly, computer modelling provide an important means to extrapolate forest responses over large spatial (regional and global) and temporal (medium- and long-term silvicultural planning) scales.

In the paper, some problems arising while attempting to model forest responses to climate change are briefly discussed in the example of two models. A first model simulates a spatial distribution of forest zonal communities representing the potential natural forest vegetation of Switzerland. A second model enables one to study the effect of increased temperature (measured by means of degree-days) on the competitive ability of major tree species occurring in Polish forests. Both models are used in simulation experiments aimed at estimation of potential consequences of climate change at the community and population level, respectively. Results of the experiments all suggest a high vulnerability of forests to the projected increase of mean annual temperature. In the case of potential natural vegetation of Switzerland, the significant changes and large shifts of vegetation zones are simulated. Similarly, the results of experiment using data for Polish forests suggest a decline

of the competitive ability of species, representing boreal and continental elements (e.g. *Pinus sylvestris* and *Picea abies*), and an increase of species related to relatively warm and oceanic climate (e.g. *Fagus sylvatica*, *Carpinus betulus*, *Quercus* sp.).

Assuming growing credibility of climatic predictions, the results of simulation modelling may be of greatest interest and importance for forest management, silvicultural planning, and forest policy at different levels of detail and integration.