

**LECH RYSZKOWSKI, ANDRZEJ KĘDZIORA**Zakład Badań Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN  
Poznań

## ROLNICTWO A EFEKT SZKLARNIOWY

### WSTĘP

Ze wszystkich dziedzin działalności gospodarczej człowieka rolnictwo jest najściślej związane z klimatem. Susze, ulewne deszcze, przymrozki decydują o osiąganych plonach nawet w sytuacjach, gdy uprawiane są odmiany roślin przystosowanych do lokalnych warunków pogodowych. Olbrzymi wpływ pogody na efekty gospodarcze rolnictwa powoduje, że badania zależności pomiędzy czynnikami klimatu a rozwojem roślin i zwierząt prowadzone są już od najdawniejszych czasów i stanowią bardzo ważny dział agroekologii. Nic więc dziwnego, że w strategii trwałego i zrównoważonego ze środowiskiem rozwoju społeczno-gospodarczego Polski dużego znaczenia nabiera przewidywanie zmian warunków klimatycznych wywoływanych przez tak zwany efekt szklarniowy. Efekt ten określony jest przez globalne zmiany klimatu spowodowane przez wzrastającą koncentrację w atmosferze  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$ , freonów oraz innych gazów pochłaniających większą część długofalowego promieniowania Ziemi. Powoduje to ogrzewanie się atmosfery, która z kolei wysyła ku Ziemi znaczne ilości ciepła jako tak zwane promieniowanie zwrotne. Substancje wywołujące ten efekt są nazywane skrótowo gazami szklarniowymi. Gdyby nie efekt szklarniowy średnia temperatura powierzchni Ziemi wynosiłaby dzisiaj  $-17^\circ\text{C}$  a nie  $15^\circ\text{C}$ . Z drugiej strony gdyby nie procesy wiązania  $\text{CO}_2$ , wśród których duże znaczenie ma fotosynteza wraz z różnymi procesami magazynowania węgla organicznego, nastąpiłoby w atmosferze tak duże stężenie dwutlenku węgla, że efekt szklarniowy uniemożliwiłby egzystencję istniejących obecnie na Ziemi organizmów. Intensywność promieniowania słonecznego oraz silny efekt szklarniowy związany z dużą koncentracją  $\text{CO}_2$  w atmosferze planety Wenus powoduje, że temperatura jej powierzchni wynosi ponad  $450^\circ\text{C}$  (Lovelock, 1989), co wyklucza istnienie życia.

Prognoza zmian warunków klimatycznych wywołanych przez narastanie efektu szklarniowego ma duże znaczenie zarówno dla strategii rozwoju rolnictwa, jak i programów ochrony środowiska. Jest to powodowane tym, że obszary rolnicze stanowią przeszło 60% powierzchni kraju i tworzą „tkankę” otaczającą i łączącą

wszystkie inne ekosystemy, a produkcja żywności jest podstawowym działem gospodarki, stanowiącym o samowystarczalności kraju. Obszary rolnicze mają również duży wpływ na cykle obiegu materii i ochronę żywych zasobów przyrody (Ryszkowski i Bałazy 1991).

Reasumując, prognoza zmian warunków klimatycznych może być pomocna do opracowywania strategii rozwoju rolnictwa oraz umożliwia odpowiednio wczesne przygotowania restrukturyzacji środków produkcji (np. wyhodowanie odpowiednich odmian), pozwalających w przyszłości na minimalizowanie negatywnych skutków przewidywanych zmian.

Należy już na wstępie podkreślić, że prognozy efektów szklarniowych obarczone są dużym stopniem niepewności, wynikającym z braków współczesnej wiedzy na temat czynników regulujących klimat. Nie można również wykluczyć zdarzeń stochastycznych okształcających kierunek zachodzących zjawisk. Należy podkreślić, że pomimo tych ograniczeń wartości prognoz cechą współczesnej nauki jest podejmowanie prób zrozumienia funkcjonowania dużych systemów przyrodniczych celem lepszego rozpoznania prawdopodobnych konsekwencji ludzkiej gospodarki. Przeprowadzone na tej podstawie bilanse przewidywanych zysków i strat stają się ważnym kryterium trwałego i zrównoważonego z warunkami przyrodniczymi rozwoju społeczno-ekonomicznego (sustainable development). Ten nowy sposób ujęcia rozwoju cywilizacji przedstawiony w raporcie pani G. Brundtland (1987) dla Organizacji Narodów Zjednoczonych zyskuje coraz większe uznanie. W sferze nauki, prognozowanie efektu szklarniowego znalazło ostatnio swój wyraz w zorganizowaniu dużego międzynarodowego programu poświęconego zmianom globalnym.

Przedstawione w tym opracowaniu rozważania odnoszą się zarówno do wpływów rolnictwa na powstawanie efektu szklarniowego, jak i zwrotnego oddziaływania zmian klimatycznych na rolnictwo wraz z uwzględnieniem sytuacji jaka może wystąpić na terenie naszego kraju.

## WPŁYW ROLNICTWA NA POWSTAWANIE EFEKTU SZKLARNIOWEGO

### ODDZIAŁYWANIA ROLNICTWA NA EMISJE GAZÓW SZKLARNIOWYCH

Pomimo istniejących ograniczeń wiedzy oraz niedokładności ocen niektórych parametrów wykonano ilościowe szacunki obiegu węgla, azotu, siarki i innych pierwiastków w skali całego globu. W ocenach tych uwzględniono również efekty przekształceń środowiska związanych z rolnictwem (Svensson i Soderlund 1975; Bolini Cook 1983; Houghton i in. 1983; Schlesinger 1986; Bouwman 1990b; Freedman 1992). Generalizując, oddziaływania rolnictwa na zmianę koncentracji gazów szklarniowych w atmosferze można podzielić na dwie kategorie.

Do pierwszej należą te wszystkie oddziaływania, które zachodzą w czasie przekształcania naturalnych ekosystemów w agroekosystemy. Gdy naturalne eko-



systemy przekształcane są w pola uprawne, wzrasta znacznie mineralizacja zasobów próchnicy, a uwalniany w tym procesie dwutlenek węgla ulatnia się do atmosfery. Do atmosfery uwalniane są również znaczne ilości  $\text{CO}_2$  i  $\text{CH}_4$ , gdy na skutek wyrębu lasu spalane są lub ulegają przyspieszonemu rozkładowi znaczne zasoby biomasy, zakumulowane w wyniku wieloletniej produkcji pierwotnej. Szklarniowe gazy uwalniane są również w procesach przekształcania ekosystemów trawiastych w pola uprawne, melioracji mokradł i innych.

Do drugiej kategorii można zaliczyć te działania rolników, które na istniejących już polach uprawnych intensyfikują ulatnianie się gazów szklarniowych. Tak na przykład intensywne nawożenie azotanami może stymulować ulatnianie podtlenku azotu, a zabiegi agrotechniczne zwiększające napowietrzenie gleby przy jednoczesnym nawożeniu azotem mogą zwiększać mineralizację próchnicy i ulatnianie się  $\text{CO}_2$ .

Choć wzrastająca koncentracja gazów szklarniowych w atmosferze jest wiązana z intensywnym zużywaniem kopalnych nośników energii przez rozwijający się przemysł i urbanizację to jednak rolnictwo ma niewątpliwie liczący się udział w tym procesie. We wcześniejszych analizach wzrost koncentracji dwutlenku węgla był wiązany ze wzrostem zużycia kopalnych nośników energii, a źródłem biologicznym nie przypisywano dużego znaczenia (np. Machta 1973; Oeschger i in. 1975; Siegenthaler i Oeschger 1978). Udział czynników biologicznych oceniano na podstawie różnicy pomiędzy roczną przemysłową emisją a przyrostem  $\text{CO}_2$  w atmosferze i ilością pochłoniętą przez oceany. Szacunki tak uzyskane wskazywały, że składowe biotyczne obiegu węgla na kuli ziemskiej magazynują niewielkie ilości węgla. Do zupełnie przeciwnych wniosków doprowadziły bezpośrednie analizy udziału składowych biotycznych w emisji  $\text{CO}_2$  opartych na zmianach użytkowania ziemi.

Pierwsza szersza analiza wpływu wyrębu lasów i przekształceń naturalnych ekosystemów w pola uprawne na zasoby  $\text{CO}_2$  w atmosferze wykazała, że w okresie od 1860 do około 1960 r. emisja  $\text{CO}_2$  ze spalonych kopalin była mniejsza niż ilość uwalniana w procesach mineralizacji próchnicy i spalania drewna z karczowanych lasów (Houghton i in. 1983). Dopiero w ciągu ostatnich 30-tu lat emisje  $\text{CO}_2$  ze spalanych kopalin przewyższają jego ilości uwalniane w związku z działalnością rolniczą. Według Houghtona i in. (1983) w okresie od 1958 r. do 1980 r. około 85,5 miliardów ton C- $\text{CO}_2$  zostało uwolnione ze spalania kopalin, a przekształcanie lasów w pola i spalanie drewna uwolniło średnio 57,3 miliardów ton C- $\text{CO}_2$ . Zakres zmienności tej ostatniej wartości został oceniony przez ten zespół (Houghton i in. 1983) na 38 do 76 miliardów ton C- $\text{CO}_2$ , w zależności od przyjętych trzech sposobów przeprowadzania tej oceny. W 1980 r. przemysł emitował około 5 miliardów ton C- $\text{CO}_2$  (Freedman 1992), podczas gdy w tym samym roku spalanie i rozkład drewna oraz mineralizacja próchnicy na polach uprawnych uwolniła od 1,8 do 4,7 miliardów ton C- $\text{CO}_2$  (Houghton i in. 1983). Pomimo tych dużych rozbieżności współczesne analizy źródeł powstawania i wiązania  $\text{CO}_2$

nie mogą pomijać wpływów przekształceń powierzchni ziemi wywoływanych przez rolnictwo.

#### WPLYW ROZSZERZANIA POWIERZCHNI UPRAW NA WZROST KONCENTRACJI GAZÓW SZKLARNIOWYCH

Duża biomasa lasów jest efektem wieloletniego magazynowania asymilatów fotosyntezy. W przeciwieństwie do lasów, na polach uprawnych masa roślinna stanowi tylko część rocznej produkcji pierwotnej. Dlatego stan biomasy roślinnej w lasach jest znacznie wyższy niż na polach uprawnych. Whittaker i Likens (1973) przyjmują, że zawartość węgla w biomase roślinności w lasach liściastych strefy umiarkowanej wynosi średnio  $135 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ , a w borach  $90 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Do przeliczeń przyjęto, że  $1 \text{ m}^3$  drewna drzew iglatych zawiera  $280 \text{ kg C}$ , a drzew liściastych  $340 \text{ kg C}$ . Natomiast na polach uprawnych średnia ilość węgla w roślinach w czasie okresu wegetacyjnego wynosi około  $2\text{--}5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ . Oceny te są oparte na przyjętym przeliczniku, w myśl którego węgiel stanowi średnio 45% całej suchej masy roślinności pól uprawnych. Oczywiście zawartość węgla w produkcji pierwotnej pól uprawnych jest większa i wynosi średnio około  $7 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (produkcja biomasy roślinnej wynosi około  $15 \text{ t} \cdot \text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{ha}^{-1}$ ) z czego w zależności od rośliny uprawnej w plonach usuwane jest od 34% do 78% (Ryszkowski 1984, 1988). Już samo zestawienie masy węgla zawartego w roślinności lasów z jego zawartością w roślinności pól uprawnych wskazuje na znaczne zubożenie zmagazynowanego w biomase roślinnej węgla w przypadku przekształcenia lasów w pola uprawne. W wyniku spalania lub rozkładu wykarczowanej masy roślinnej duża ilość węgla zawartego w masie drzew ulatnia się do atmosfery. Drugim ważnym procesem stymulującym ulatnianie się dwutlenku węgla do atmosfery jest zwiększona mineralizacja zasobów materii organicznej gleby pod wpływem jej uprawy. Straty próchnicy są znacznie szybsze w pierwszych latach uprawy nowiny niż w okresie późniejszym, przy czym mamy do czynienia nie tylko z mineralizacją próchnicy, ale i z przemieszczaniem się związków organicznych do głębszych warstw profilu glebowego (Schlesinger 1986). Autor ten, analizując wiele wyników badań, dochodzi do wniosku, że prawdopodobnie około 500 lat temu oddziaływania rolnictwa nie były na tyle intensywne, aby zmniejszać zasoby materii organicznej gleby. Procesy regeneracji względnie dobrze zbilansowały straty próchnicy. Ten stan względnej równowagi magazynowania i strat węgla z gleby został zmieniony wraz z rozwojem współczesnego intensywnego rolnictwa, które na terenach upraw powoduje spadek zasobów próchnicy (Schlesinger 1986). Uprawa roli prowadzi do spadku zasobów materii organicznej gleby. Choć część tych strat można wytłumaczyć procesami erozji, przemywania przez profil glebowy i innymi to jednak — jak to wykazali Houghton i in. (1983) — przeważająca część węgla ulotniła się z gleby w postaci  $\text{CO}_2$ .

Bagna, torfowiska i inne podmokłe ekosystemy kumulują masę organiczną. Tempo kumulacji waha się w granicach od 5 do  $150 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$ . Przyjmując, że



średnia roczna kumulacja wynosi  $30 \text{ g} \cdot \text{C} \cdot \text{m}^{-2}$  oraz że obszar terenów podmokłych wynosi 4,5 miliona  $\text{km}^2$ , to oceniona kumulacja w naturalnych podmokłych ekosystemach kuli ziemskiej wynosi około 140 milionów ton (Schlesinger 1986; Bouwman 1990). Przyjmując za Aselmannem i Crutzenem (1990), że poprawniejsza ocena obszaru naturalnych ekosystemów podmokłych wynosi  $5,7 \text{ miliona km}^2$  to wielkość związanego rocznie węgla w tych ekosystemach wyniesie 171 milionów ton. Oceniając, że na kuli ziemskiej zostało zmeliorowane do  $350\,000 \text{ km}^2$ , a średnie straty w procesach utleniania wynoszą  $10 \text{ t} \cdot \text{C} \cdot \text{ha}^{-2} \cdot \text{rok}$ , Bouwman (1990) wylicza, że około 35 milionów ton węgla jest rocznie traczone w wyniku utleniania zmeliorowanych gleb. Podobną ocenę podaje Schlesinger (1986). Straty powyższe są niskie w stosunku do kumulacji węgla w tych ekosystemach i dlatego możnaby było sądzić, że istniejące podmokłe ekosystemy jako całość magazynują węgiel. Ocenione powyżej straty węgla nie uwzględniają emisji metanu, ocenianej na około 37–75 milionów ton, jeśli oceny Schutza i współautorów (1990) zostaną przeliczone tylko na masę emitowanego węgla. Uwzględniając to ostatnie źródło dopływu węgla do atmosfery całkowita ilość traczonego węgla z gleb organicznych jest niewiele mniejsza lub nawet równa ilości magazynowanego rocznie węgla, jeżeli uwzględnić górną granicę ocen Schutza i in. (1990).

Przytoczone powyżej szacunki dobrze ilustrują trudności napotykane w globalnych ocenach węgla. Olbrzymie znaczenie dla przeprowadzanych szacunków ma nie tylko poprawna ocena reprezentatywnych parametrów wymiany gazów szklarniowych pomiędzy wyróżnianymi klasami ekosystemów a atmosferą, ale również szacunek terytorialnych rozmiarów wyróżnianych kategorii użytkowania powierzchni ziemi. Pomimo jednak niedokładności ocen tych dwóch wielkości, na podstawie omówionych powyżej wyników, jak i wielu innych pominiętych tu z braku miejsca prac, można sądzić, że przekształcenia naturalnych ekosystemów w pola uprawne prowadzą obecnie do wzrostu koncentracji gazów szklarniowych, a zwłaszcza  $\text{CO}_2$  i  $\text{CH}_4$ . Jest to zjawisko mniej intensywne niż emisje gazów szklarniowych przez przemysł, motoryzację, składowanie organicznych odpadów i inne, ale liczące się w ogólnym bilansie wymiany tych gazów pomiędzy ekosystemami lądowymi a atmosferą. Fakt ten powinien być uwzględniony w propozycjach strategii ograniczania wzrostu koncentracji gazów szklarniowych w atmosferze.

#### WPŁYW INTENSYFIKACJI ROLNICTWA NA EMISJĘ GAZÓW SZKLARNIOWYCH

Jak powszechnie wiadomo, współczesne tendencje intensywnej uprawy roli, wyrażające się dużą specjalizacją upraw, prowadzącą w skrajnych przypadkach do monokultur, wraz z ograniczonym nawożeniem organicznym czy to w postaci nawozów zielonych czy obornika, prowadzą do spadku zasobów próchnicy. Ciągłe przewracanie gleby, powodujące jej aerację wraz z rozbiciem agregatów glebowych, może prowadzić do szybszego utleniania materii organicznej gleby (Bouwman 1990). W glebie pól uprawnych wzrasta rola bakterii w stosunku do grzybów,

wyrażająca się większym ich udziałem w ogólnej masie drobnoustrojów (Gołębiowska i Ryszkowski 1977; Voroney i in. 1981; Kaszubiak i Kaczmarek 1985), zawężonym stosunkiem C : N i szybszą rotacją biomasy (McGill i in. 1981). Czynniki te powodują, że rotacja węgla w glebie pól uprawnych jest większa niż w ekosystemach leśnych i trawiastych. Szczególnie intensywna mineralizacja następuje w glebach pól uprawnych tropików. Lugo i Brown (1986) stwierdzili mineralizację 46% materii organicznej w ciągu 10 lat na polach położonych w tropikach, gdy gleba zawierała dostateczne zapasy wilgoci. Uprawy ryżu stanowią ważne źródło emisji  $\text{CH}_4$ . Roczna emisja z pól ryżowych wynosi od 45 do 105 milionów ton po przeliczeniu danych Aselmann i Crutzena (1990) na ułatnianie się C- $\text{CH}_4$ . Jest to wielkość równoważąca emisję metanu ze wszystkich naturalnych ekosystemów podmokłych.

Następnym ważnym źródłem metanu są hodowane zwierzęta. Rocznie wydzielane jest przez nie około 57 milionów ton C- $\text{CH}_4$ . W tej wielkości krowy mają udział największy (40 milionów ton C- $\text{CH}_4$ ) (Bouwman 1990).

Produkcja metanu w hodowli ryżu i zwierząt gospodarskich znacznie przewyższa produkcję metanu w bagnach i torfowiskach kuli ziemskiej. Wzrastające potrzeby żywnościowe będą powodowały, że produkcja metanu w rozwijającej się hodowli zwierząt i uprawach ryżu będzie wzrastała. Wzrastająca koncentracja metanu w atmosferze wskazuje, że obecnie w ciągu roku przewaga produkcji  $\text{CH}_4$  nad jego rozkładem wynosi od 30 do 53 t C- $\text{CH}_4$ , a istniejąca silna korelacja pomiędzy przyrostem ludności kuli ziemskiej a wzrostem koncentracji  $\text{CH}_4$  w atmosferze sugeruje, że czynniki antropogeniczne związane z rolnictwem mają duże znaczenie (Bouwman 1990).

Podtlenek azotu jest gazem szklarniowym, który powstaje zarówno w procesach denitryfikacji jak i nitryfikacji. Roczny wzrost koncentracji  $\text{N}_2\text{O}$  w atmosferze oceniany jest na 2,8 miliona ton (Bouwman 1990). Choć największe ilości  $\text{N}_2\text{O}$  uwalniane są z naturalnych ekosystemów lądowych i wodnych, to jednak pola uprawne, szczególnie nawożone wysokimi dawkami azotu i zmeliorowane, produkują duże ilości  $\text{N}_2\text{O}$  (Bouwman 1990). Brak jest jednak ocen jak nawożenie pól uprawnych azotem wpływa na emisję  $\text{N}_2\text{O}$  z dużych terenów rolniczych.

Omawiane wyniki badań nie pozwalają jeszcze na dokładne ilościowe określenie udziału rolnictwa we wzroście koncentracji gazów szklarniowych. Przedstawione wyniki badań sugerują jednak, że uprawa roli i hodowla zwierząt stymuluje wzrost koncentracji gazów szklarniowych. Szczególnie wyraźnie można rozpoznać wpływ intensyfikacji hodowli zwierząt i upraw ryżu na emisję metanu oraz wpływ przekształcania lasów w pola uprawne na wzrost emisji  $\text{CO}_2$ . Podobnie uprawa gleb stymuluje uwalnianie znacznych ilości  $\text{CO}_2$  poprzez wzmożoną mineralizację próchnicy. Łączny efekt tych oddziaływań, choć mniejszy niż oddziaływania przemysłu, niewątpliwie jest znaczący dla bilansu wymiany gazów szklarniowych pomiędzy powierzchnią ziemi a atmosferą.



## ODDZIAŁYWANIE GAZÓW SZKLARNIOWYCH NA ROŚLINY UPRAWNE

## RODZAJE ODDZIAŁYWAŃ

Oddziaływanie wzrostu koncentracji gazów szklarniowych na produkcję roślinną należy rozpatrywać w dwóch kategoriach. Do pierwszej należą bezpośrednie reakcje fizjologiczne na zmiany koncentracji gazów szklarniowych, jak na przykład bezpośrednie oddziaływanie wzrostu koncentracji  $\text{CO}_2$  na intensyfikację fotosyntezy. Oddziaływanie to często określane jest jako efekt nawożeniowy  $\text{CO}_2$ . Do tej kategorii należy też zaliczyć bezpośrednie oddziaływania  $\text{CO}_2$  na rozwój tkanek asymilujących  $\text{CO}_2$ , foteorespirację, obniżenie intensywności transpiracji przez rośliny związane z częściowym zamykaniem szparek liściowych w warunkach podwyższonych koncentracji  $\text{CO}_2$  i inne. Do drugiej kategorii należą pośrednie oddziaływania wzrostu koncentracji gazów szklarniowych na produkcję roślinną przez zmiany warunków klimatycznych. Do pośrednich oddziaływań oprócz zmian klimatycznych można też zaliczyć bardziej skomplikowane współzależności pomiędzy zmianami klimatycznymi a innymi warunkami określającymi rozwój roślin. Są to przykładowo przemiany właściwości gleb wywołane zmianami klimatu. Należy również oczekiwać, że zmienne warunki klimatyczne będą miały wpływ na relacje pomiędzy roślinami a zwierzętami i drobnoustrojami, a zwłaszcza szkodnikami i patogenami roślin. Zmieniają się warunki konkurencji pomiędzy różnymi gatunkami roślin, na przykład chwastami a roślinami uprawnymi, można również oczekiwać odkształceń szeregu procesów mikrobiologicznych. Nastąpią więc przekształcenia współzależności pomiędzy składowymi agroekosystemów wywołane przez zmiany klimatyczne, czy też przez bezpośrednie oddziaływania zmian koncentracji gazów szklarniowych na organizmy. Dopiero poznanie tych skomplikowanych ekosystemowych współzależności pozwala na opracowanie poprawnych ekologicznie prognoz. Prognoza reakcji dużych ekologicznych układów oparta tylko na współzależnościach stwierdzonych w uproszczonych warunkach laboratoryjnych może prowadzić do błędnych wniosków. Szczególnie dużą ostrożność należy zachować przy ekstrapolacji do warunków polowych wyników badań uzyskanych w izolowanych, krótkoterminowych eksperymentalnych hodowlach poszczególnych tkanek czy roślin. Często występujące zjawiska synergizmu działania czynników i kompensacji funkcji w organizmach powodują, że ekstrapolacja charakterystyk niższego poziomu hierarchicznego analizowanego systemu na wyższy poziom może prowadzić do błędnych wniosków.

## ODDZIAŁYWANIA BEZPOŚREDNIE

Rośliny, pochłaniając  $\text{CO}_2$  w procesach fotosyntezy, mają olbrzymi wpływ na regulację koncentracji tego gazu w atmosferze. Dlatego rozstrzygnięcie problemu, czy roślinność rzeczywiście zwiększa asymilację  $\text{CO}_2$  wraz ze wzrostem jego koncentracji w powietrzu (tzw. efekt nawożenia), co wyrażałoby się podniesieniem

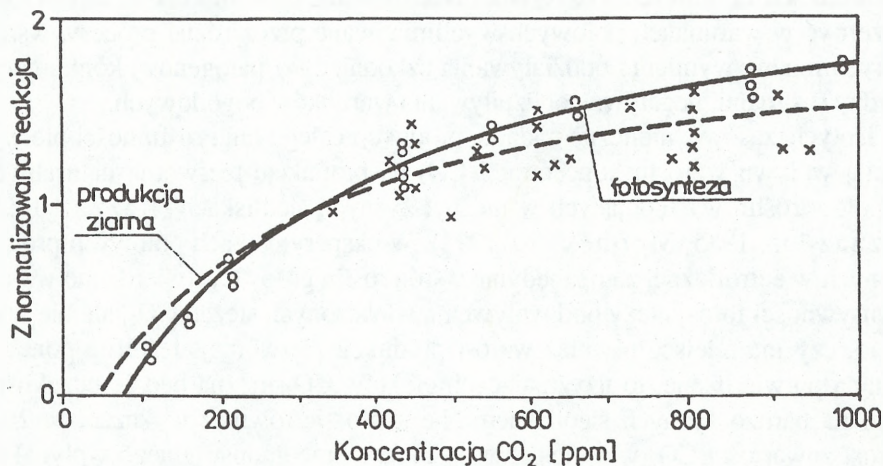
intensywności produkcji biomasy, ma duże znaczenie teoretyczne dla modelowania obiegu węgla w przyrodzie. Rozstrzygnięcie tego zagadnienia może mieć również praktyczne znaczenie dla planów zabezpieczenia produkcji większej ilości żywności dla ludzi i zwierząt hodowlanych. Gdyby stymulacja produkcji biomasy rzeczywiście wystąpiła, mogłoby to w pewnym stopniu rekompensować negatywne skutki efektu szklarniowego, przykładowo zalewania przez morze nisko położonych części lądu, czy też zwiększonej częstości występowania ekstremalnych wartości czynników klimatycznych.

Przeprowadzone badania laboratoryjne nad tkankami lub poszczególnymi roślinami uprawnymi wykazały, że w warunkach optymalnych wzrost  $\text{CO}_2$  prowadzi do wzrostu tempa fotosyntezy czy też wzrostu plonów, choć stopień reakcji jest zróżnicowany w zależności od gatunku, a nawet odmiany rośliny (Acock i Allen 1985, Bazzaz 1990). Tak na przykład wzrost koncentracji  $\text{CO}_2$  z 330 ppm do 660 ppm spowodował przy optymalnych warunkach wzrost plonów koniczyny o 4%, bawełny o 104%. Wśród zbóż wzrost ten wynosił: dla ryżu 9%, kukurydzy 16%, jęczmienia 36%, pszenicy 38%. Hodując rośliny w optymalnych warunkach można stwierdzić, że wzrost koncentracji  $\text{CO}_2$  spowoduje wyraźny wzrost szybkości fotosyntezy, częściowe zamykanie aparatów szparkowych i spadek transpiracji wśród tak zwanych roślin  $\text{C}_3$  (rośliny zmniejszające fotooddychanie), do których należy też pszenica. Wśród roślin  $\text{C}_4$ , do których należy też kukurydza, następuje w tych warunkach niewielki wzrost intensywności fotosyntezy (Acock i Allen 1985).

Wyraźna reakcja procesu fotosyntezy na wzrost koncentracji  $\text{CO}_2$  (Acock i Allen 1985) zachodzi w szerszym zakresie zmian  $\text{CO}_2$  niż ma to miejsce z przyrostami masy asymilatów w poszczególnych organach roślin. Na przykład po znormalizowaniu rezultatów doświadczeń przez odniesienie ich do wyników uzyskanych przy koncentracji  $\text{CO}_2$  równej 330–340 ppm można było porównać ze sobą reakcje fotosyntezy soi (roślina  $\text{C}_3$ ) na wzrost koncentracji  $\text{CO}_2$  z produkcją nasion tej rośliny hodowanej w optymalnych warunkach laboratoryjnych w tym samym zakresie zmian stężeń  $\text{CO}_2$ . W ten sposób Acock i Allen (1985) mogli wykazać, że przy dużych stężeniach  $\text{CO}_2$  (powyżej 400 ppm) przyrosty intensywności fotosyntezy są większe niż ma to miejsce w przypadku produkcji masy ziaren soi (rys. 1). Wskazuje to na większy stopień stabilności produkcji biomasy pomimo zmian koncentracji  $\text{CO}_2$ , niż ma to miejsce w przypadku fotosyntezy. Zróżnicowane reakcje na wzrost koncentracji wykazują nie tylko odmienne gatunki czy odmiany roślin, ale i poszczególne organy tej samej rośliny. Przykładowo wśród typowych roślin  $\text{C}_3$  należy się spodziewać większego wzrostu korzeni niż łodyg, przy najmniejszym przyroście liści (Acock i Allen 1985). Pamiętając o dużych międzygatunkowych czy nawet międzyodmianowych różnicach, można oczekiwać, że w idealnych warunkach plony, które stanowią części systemu korzeniowego (np. bulwy ziemniaków) będą reagowały silniej na wzrost stężenia  $\text{CO}_2$  niż na przykład ziarna zbóż (Acock i Allen 1985).



Wzrost temperatury zmienia relacje pomiędzy stratami węgla w procesach dziennej respiracji a jego magazynowaniem w procesach fotosyntezy. W rezultacie łącznego oddziaływania wzrostu  $\text{CO}_2$  i temperatury następuje większy wzrost biomasy wśród roślin  $\text{C}_3$  hodowanych w warunkach laboratoryjnych (Long 1991; Hendrey 1992). Wśród roślin  $\text{C}_4$  (jak np. kukurydza, sorgo, trzcina cukrowa) oddziaływania wzrostu koncentracji  $\text{CO}_2$  na produkcję biomasy nie są tak wyraźne (Mooney i in. 1991; Long 1991, Hendrey 1992).



Rys. 1. Wpływ wzrastającej koncentracji  $\text{CO}_2$  na fotosyntezę i plony (Acock i Allen 1985).

Wyniki powyższe zostały otrzymane w warunkach laboratoryjnych, w których zmianie podlegają tylko badane czynniki, pozostałe zaś czynniki wpływające na wzrost roślin są utrzymywane na stałym i optymalnym poziomie. Optymalne warunki rozwojowe nie występują jednak na polach uprawnych, zdarzają się też deficyty mineralnych składników odżywczych. Jak wykazały badania, zmienność temperatury i warunków wilgotnościowych, braki składników odżywczych i inne ograniczają lub niwelują wzrost plonów wywołany wyższą koncentracją  $\text{CO}_2$  (Acock i Allen 1985; Lange i in. 1987; Bazzaz 1990, Mooney i in. 1991; Hendrey 1992).

Wiele omówionych powyżej doświadczeń przeprowadzono w krótkich okresach. W niektórych doświadczeniach prowadzonych przez dłuższy czas stwierdzono, że rośliny hodowane w warunkach podwyższonej koncentracji  $\text{CO}_2$  po początkowym okresie wzrostu intensywności fotosyntezy obniżają jej poziom. Zjawisko to zostało nazwane adaptacją roślin do podwyższonej koncentracji  $\text{CO}_2$  (Acock i Allen 1985; Hendrey 1992). Jeżeli zjawisko to występuje wśród wielu roślin, to przypuszczenia, że w naturalnych warunkach wraz ze wzrostem koncentracji  $\text{CO}_2$  wzrośnie intensywność produkcji biomasy, mogą okazać się błędne.

Wśród roślin zbożowych, motylkowych i oleistych plon stanowią nasiona. Plon zależy więc w większym stopniu od warunków kontrolujących kwitnienie, a więc od długości dnia i temperatury, nie zaś od wzrostu  $\text{CO}_2$ . Na przykład

podwyższone temperatury skracają okres wypełniania kłosów, co może negatywnie wpływać na wysokość plonu. Można więc oczekiwać, że wzrost temperatury wywołany efektem szklarniowym może kompensować pozytywne oddziaływania podwyższonych koncentracji CO<sub>2</sub> (Sinha 1991).

Większość roślin uprawnych należy do grupy C<sub>3</sub>, które zgodnie z wynikami badań laboratoryjnych reagują wzrostem biomasy przy podwyższonych koncentracjach CO<sub>2</sub>. Nie ma jednak pewności, czy rzeczywiście zjawisko to wystąpi w warunkach terenowych. Pozytywne oddziaływanie wzrostu stężeń CO<sub>2</sub> na plony może być w warunkach polowych wyeliminowane przez różne procesy, wśród których można wymienić oddziaływania szkodników i patogenów, konkurencję między roślinami, negatywne oddziaływania warunków pogodowych.

Dotychczasowe, nieliczne badania produkcji całego ładu roślinności nie wykazują wpływu wzrostu koncentracji CO<sub>2</sub> na produkcję pierwotną naturalnych zespołów roślin występujących w niezbyt żyznych siedliskach (Bazzaz 1990; Bazzaz i in. 1985; Mooney i in. 1991). W eksperymentach polowych prowadzonych w eutroficznej zatoce jedynie wśród roślin grupy C<sub>3</sub> stwierdzono wzrost intensywności fotosyntezy pod wpływem zwiększonych stężeń CO<sub>2</sub>, ale nie wiadomo, czy ma miejsce również wzrost produkcji pierwotnej. Jeżeli te pomiary zostaną potwierdzone, to użytkujących efektów CO<sub>2</sub> można będzie oczekiwać tylko na bardzo żyznych siedliskach. Nie udało się również wykazać, że 20% wzrost zawartości CO<sub>2</sub> w atmosferze od okresu przedindustrialnego wpłynął na wzrost produkcji roślin (Strain 1985; Sinha 1991). Analizując w podobnych warunkach klimatycznych zjawiska konwergencji produkcji pierwotnej ekosystemów łąkowych, leśnych i agroeosystemów, w których roślinność występowała w ciągu całego okresu wegetacyjnego, Ryszkowski (1984, 1988) wykazał większą stałość wielkości produkcji pierwotnej niż plonów, co powodowane jest występowaniem procesów kompensacji w trakcie rozwoju ładu roślinności. Wzrost jednego organu rośliny wiąże się często z mniejszym rozwojem jej innego organu, podobnie jak silny rozwój jednego gatunku roślin jest związany ze słabszym rozwojem drugiego gatunku. Zjawiska kompensacji w obrębie całego ładu roślinności powodują, że produkcja całego zespołu roślinnego czy też ładu jest znacznie bardziej stała niż produkcja poszczególnych jego komponentów, pomimo dużej zmienności czynników oddziałujących na produkcję.

Generalnie można przypuszczać, że stwierdzone w laboratoryjnych warunkach pozytywne oddziaływanie wzrostu stężenia CO<sub>2</sub> na produkcję roślinną najprawdopodobniej nie będzie miało miejsca w warunkach polowych.

#### POŚREDNIE ODDZIAŁYWANIA EFEKTU SZKLARNIANEGO NA PRODUKCJĘ ROŚLINNĄ

Bardzo istotne znaczenie dla prognoz pośrednich oddziaływań wzrostu koncentracji CO<sub>2</sub> na rolnictwo będzie miała kwestia zmian ilości opadów. Jest to bardzo kontrowersyjny problem. Część badaczy przypuszcza, że wraz ze wzrostem temperatury nastąpi przesuszenie terenu (np. Scott i in. 1990), inni natomiast



uważają, że efekt szklarniowy na tym samym obszarze spowoduje wzrost opadów (Decker i in. 1985). Generalnie można stwierdzić, że prognozowanie wpływu efektu szklarniowego na reżim wodny określonego regionu jest niepewne (Hendrey 1992; Parry i Carter 1991; Hekstra 1991). Przy wzrastającym przesuszeniu można oczekiwać, że zmniejszenie transpiracji wywołane wzrostem koncentracji CO<sub>2</sub> może do pewnych granic przeciwdziałać negatywnym wpływom braku wody na produkcję rolniczą (Acock i Allen 1985, Mooney i in. 1991). Większe jednak znaczenie będzie niewątpliwie miał wzrost intensywności transpiracji i parowania wywołany wzrostem temperatury. Intensywność ewapotranspiracji jest ponadto regulowana przez stopień zachmurzenia i szybkość wiatru. Nie wiadomo jednak jak te dwa ostatnie czynniki klimatyczne będą zmieniały się na skutek efektu cieplarnianego. W celu ograniczenia negatywnych skutków wiosennego przesuszenia większe znaczenie mogą zyskać uprawy odmian ozimych.

Na podstawie syntetycznego opracowania Hekstry (1991) dotyczącego zmiany warunków klimatycznych i siedliskowych Europy oraz przewidywanych ich skutków dla rolnictwa można przedstawić skrótowo następujący scenariusz przekształceń.

Przewidywany wzrost temperatur do 2050 roku wyniesie od 1,5°C do 4,5°C. Prognozy zmian ilości opadów są mniej dokładne i różne modele podają nawet przeciwstawne oceny. Choć dokładność poszczególnych prognoz może być dyskutowana, to jednak nie ma wątpliwości, że nastąpią zmiany klimatyczne wpływające na naturalne zespoły roślinności, rolnictwo i leśnictwo. Niskie strefy pobrażę morza zostaną narażone na zalanie, a ekstremalne, zjawiska pogodowe będą groźniejsze i częstsze.

W strefie śródziemnomorskiej przewidywany jest wzrost przesuszenia terenów, co może ujemnie odbijać się na plonach, jeśli nie będą podjęte na szeroką skalę nawadniania pól. Jednak zwiększające się spływy powierzchniowe po ulewnych, krótkotrwałych deszczach spowodują znaczne zasolenie wód na skutek erozji. W regionie tym przestaną występować przymrozki, zagrażające obecnie plantacjom drzew owocowych. Różne modele prognoz przewidują albo generalne obniżenie produkcji rolnej, albo jej utrzymanie lub wzrost w przypadku wykorzystania zdobyczy inżynierii genetycznej.

Na terenach gór (Pireneje, Alpy, Karpaty, Kaukaz) wzrost temperatury spowoduje przesunięcie w górę stref roślinności o około 500 m na stokach północnych i 800 m na stokach południowych, a okres wegetacji we wszystkich strefach znacznie się wydłuży. Lodowce w Alpach ulegną zmniejszeniu. Rolnictwo w niższych partiach gór zacznie odchodzić od wypasu zwierząt na pastwiskach, a znacznie wzrośnie uprawa warzyw, tytoniu i winorośli. Lasy zmniejszą swój zasięg ze względu na narastające niedobory wody oraz oddziaływanie kwaśnych deszczy.

W Europie Zachodniej, objętej klimatem oceanicznym, czynnikiem decydującym o zmianach roślinności będzie działalność człowieka. Już obecnie obszar ten

jest najbardziej w Europie przekształcony przez człowieka. Obszary południowej Francji i północnej Hiszpanii staną się bardziej suche, w związku z czym wzrosną potrzeby nawodnień koniecznych dla rozwoju rolnictwa. Rzeki, jak Ren, Wezera, Elba, będą wykazywały krótszy okres wezbrań wiosennych następujących po wcześniejszym stopieniu śniegu w Alpach. Częściej będą w nich występowały również bardzo niskie stany wody w okresach letnich. Istniejące już obecnie problemy nadprodukcji rolniczej i wynikające z niej porzucanie gruntów uprawnych być może pozwoli przez odpowiednią zabudowę biologiczną odłogów opłacać problemy erozji. Jest to obszar, gdzie w wyniku dobrego nawożenia oraz rozwiniętych form walki ze szkodnikami i patogenami może dojść do stymulacji produkcji na skutek podwyższonej koncentracji  $\text{CO}_2$  w powietrzu. Wystąpieniu tego efektu będzie przeciwdziałało narastanie suszy.

We Europie Wschodniej wystąpi znaczny wzrost intensywności parowania potencjalnego. Natomiast wielkość jak i rozkład opadów są odmiennie prognozowane przez różne modele. Tak na przykład na południu Ukrainy według jednych prognoz będzie wzrastało przesuszenie i wystąpią zjawiska zasolenia gleb, co ujemnie odbije się na produkcji rolniczej. Według innych scenariuszy opady wzrosną, co będzie sprzyjało znacznemu wzrostowi produkcji rolnej. Przewiduje się, że w górnym dorzeczu Wołgi oraz w zlewni Wisły opady wzrosną, co również będzie stymulowało wzrost produkcji rolnej. Wiele upraw przesunie się bardziej na północ.

W strefie lasów borealnych wystąpią duże zmiany roślinności wyrażające się ekspansją gatunków liściastych. Naturalne zespoły roślinne ulegną bardzo dużym zmianom. Nastąpi znaczny rozwój rolnictwa związany z introdukcją do Skandynawii wielu dotychczas nie uprawianych tam roślin.

Przedstawiony przez He kstrę (1991) syntetyczny scenariusz zmian klimatu, warunków siedliskowych i roślinności powodowanych przez efekt szklarniowy należy uzupełnić informacjami charakteryzującymi przewidywane zmiany współzależności biocenotycznych, które mogą mieć znaczenie dla rozwoju rolnictwa.

Wzrost  $\text{CO}_2$ , oddziałując na zmniejszenie koncentracji azotu w tkankach roślin (Bazzaz 1990; Overdieck 1990) może zmienić wartości odżywcze tkanek roślinnych, co zwrótnie może zwiększyć presję roślinożerców na rośliny. Roślinożerco bowiem zjadają więcej pokarmu o małej zawartości azotu niż, gdy biomasa roślinna jest bogata w azot. Zmniejszona zawartość azotu powoduje, że relacje ilości tego pierwiastka do ilości węgla w tkankach ulegają zmianie, co może mieć wpływ na szybkość rozkładu resztek roślinnych przez drobnoustroje (Bazzaz 1990; Overdieck 1990; Mooney i in. 1991). Niektóre wyniki badań omówione przez Bazzaza (1990) wskazują, że wśród roślin rozwijających się w warunkach podwyższonych koncentracji  $\text{CO}_2$  następuje silniejsze wykształcenie drobnych korzeni (prawdopodobnie również zwiększone są ilości wydzielin związków organicznych z korzeni), co sprzyja rozwojowi mikoryzy oraz zmienia relacje występowania różnych grup funkcjonalnych drobnoustrojów.



Bardzo ciekawe są wyniki eksperymentów wskazujących, że przy podwyższonych stężeniach  $\text{CO}_2$  rośnie odporność niektórych gatunków roślin na działanie ozonu i dwutlenku siarki. Jest to wynikiem częściowego zamykania się szparek liściowych przy podwyższonej koncentracji  $\text{CO}_2$ , na co wskazywałoby to, że rośliny z grupy  $\text{C}_4$ , wykazujące w mniejszym stopniu zamykanie szparek przy wzroście koncentracji  $\text{CO}_2$ , są znacznie mniej odporne na uszkodzenia przez  $\text{O}_3$  i  $\text{SO}_2$  niż rośliny z grupy  $\text{C}_3$  (Bazzaz 1990).

Przedstawione powyżej przykłady zmian funkcjonalnych relacji pomiędzy roślinami a zwierzętami, czy mikroorganizmami w wyniku oddziaływania podwyższonych koncentracji  $\text{CO}_2$  zostały wykryte w badaniach laboratoryjnych. Odnosząc się więc do nich te same zastrzeżenia, które zostały wysunięte w odniesieniu do laboratoryjnych badań wykazujących wpływ podwyższonych koncentracji  $\text{CO}_2$  na produkcję biomasy roślin. Nie jest pewne, jak wyraźnie zjawiska te wystąpią w warunkach polowych. Można sobie wyobrazić, że spowolniony rozkład resztek roślinnych powodowany szerszym stosunkiem C : N będzie kompensowany szybszym rozkładem wywołanym podwyższoną temperaturą. Generalizując, należy więc jeszcze raz podkreślić, że przenoszenie wyników badań laboratoryjnych do warunków terenowych powinno być dokonane bardzo ostrożnie.

Wydłużające się na skutek efektu szklarniowego okresy wegetacji będą sprzyjały rozwojowi chwastów, zwłaszcza tych o krótkim okresie rozwoju, co umożliwi im zwiększenie liczby generacji w ciągu roku. Należą tu takie gatunki, jak *Stellaria media* czy *Capsella bursa-pastoris* (Ketner 1990). Narastające ocieplenie klimatu będzie miało również wpływ na przesunięcie się na północ wielu gatunków chwastów, zwłaszcza tych, które silnie opanowują uprawy w rejonach południowych, jak *Amaranthus* sp, *Portulaca oleracea* i inne należące głównie do grupy roślin  $\text{C}_4$ . Stanowią one już obecnie problem na wielu uprawach spowodowany nieświadomym rozprzestrzenianiem ich przez człowieka. Wiele danych wskazuje, że przy wzroście temperatury i wydłużaniu się okresu wegetacji zasoby nasion chwastów w glebie znacznie wzrosną (Ketner 1990). Należy więc sądzić, że występowanie chwastów stanie się jeszcze poważniejszym problemem, a ich zwalczanie będzie wymagało wielu wysiłków w przyszłości.

Gdyby w wyniku efektu szklarniowego nastąpiło ocieplenie i wzrosła ilość opadów, będzie to nie tylko stymulowało jeszcze bujniejszy rozwój chwastów, ale również intensywniejsze występowanie patogenów porażających uprawy roślin (Bazzaz i in. 1985; Decker i in. 1985; Parry i Carter 1991). Na przykład oceniono, że w wyniku ocieplenia na Islandii będzie można zintensyfikować uprawę jęczmienia. Obecnie szkody wywołane przez szkodniki i patogeny nie mają znaczenia. Przy ociepleniu się klimatu szkody te mogą dochodzić do 15% plonów (Bergthorsson i in. 1988).

Człowiek kontroluje warunki środowiskowe hodowanych zwierząt. Dlatego oddziaływania efektu szklarniowego na produkcję zwierzęcą będą głównie zwią-

zane z podniesieniem kosztów utrzymania klimatyzacji warunków życia zwierząt. Oprócz tego można oczekiwać następujących efektów zmian klimatu:

a) produkcja zwierzęca może wzrosnąć na skutek cieplejszych zim, ale zbyt gorące lata będą oddziaływały na nią ujemnie;

b) wyższe temperatury letnie zwiększą ryzyko wyginięcia zwierząt na skutek przegrzania;

c) wyższe temperatury letnie obniżą rozród hodowanych zwierząt (Decker i in. 1985).

#### SCENARIUSZE ZMIAN KLIMATYCZNYCH W POLSCE

##### Założenia i sposoby obliczeń

Podjęte próby weryfikacji wyników uzyskanych z modelu ogólnej cyrkulacji atmosfery (GCM) przez porównanie ich z rzeczywistymi ilościami opadów w Europie w okresie 1931–1960 wykazały ich znaczne odchylenia, szczególnie duże dla obszaru północnych Niemiec oraz Polski (Parry i Carter 1991). W tej sytuacji przedstawione poniżej oceny zmian klimatycznych w Polsce wywołanych efektem szklarniowym (podwojenie koncentracji  $\text{CO}_2$ ) przedstawiono w postaci założonych scenariuszy opadów. W pierwszej grupie scenariuszy w stosunku do panującej obecnie sytuacji przyjęto, że opady wzrosną o 23% (Jager 1986), a w drugiej, że zmaleją o 20% (tab. 1). Ponieważ lasy wywierają duży wpływ na strukturę bilansu cieplnego, dla każdej klasy zmian ilości opadów wyróżniono trzy sytuacje, w których lesistość poszczególnych regionów wzrosła o 10%, zmalała o 50% lub w wyniku bardzo silnych zanieczyszczeń środowiska lasy zupełnie wymarły. Jest to skrajny przypadek, który z pewnością nie wystąpi, ale analiza skutków takiej sytuacji pozwala lepiej ocenić znaczenie lasów dla kształtowania struktury bilansu cieplnego i wodnego poszczególnych regionów kraju. Wzrost temperatur w stosunku do obecnej sytuacji, w okresie podwojenia koncentracji  $\text{CO}_2$  w atmosferze przyjęto z modelu GCM (Jager 1986). Wynosi on  $2^\circ\text{C}$  latem i  $6^\circ\text{C}$  zimą. Cały obszar kraju podzielono na 28 regionów przyjmując charakterystyki klimatyczne Romera (1949). Niektóre z regionów klimatycznych Romera podzielono na mniejsze z powodu zróżnicowanego użytkowania terenu (Kędziora i in. 1989). Oceny zmian klimatycznych przeprowadzono dla każdego miesiąca a wyniki uśredniono dla okresu ciepłego (kwiecień–wrzesień), zimnego (październik–marzec) i dla całego roku. Obecny stopień zalesienia poszczególnych regionów przyjęto według danych GUS za rok 1986. Szczegółowe informacje na ten temat podano w pracy Kędziory i in. (1989). Dla ocen zmian warunków klimatycznych, wywołanych przez efekt szklarniowy przy podwojeniu obecnej koncentracji  $\text{CO}_2$ , oszacowano składowe bilansu cieplnego:  $R_n$  — saldo promieniowania;  $LE$  — utajone ciepło parowania,  $S$  — ciepło wykorzystane do ogrzania powietrza. W analizie struktury bilansu wodnego oszacowano opad ( $OP$ ), parowanie rzeczywiste ( $ETR$ ) i parowanie potencjalne ( $ETP$ ). Sposoby obliczania



poszczególnych parametrów przedstawiono w pracach Kędziora i in. (1989) i Ryszkowski i in. (1991).

Tabela 1

Scenariusze prawdopodobnych zmian klimatycznych i lesistości w Polsce, powstałych w wyniku podwojenia się zawartości CO<sub>2</sub> w atmosferze

| Sce-<br>na-<br>riusz | Zmiany temperatury                                             | Zmiany opadów                                                                         | Zmiany lesistości                           |
|----------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 0                    | Temperatura waha się od 0° do -6°C zimą i od 16° do 19°C latem | Najniższe zimą<br>Najwyższe latem<br>Suma roczna 700 mm                               | 28% powierzchni                             |
| 1                    | Wzrost temperatury o 2°C latem i o 6°C zimą                    | Wzrost opadów o 0,6 mm/dobę wiosną i o 0,4 mm/dobę w pozostałym okresie średnio o 23% | Wzrost lesistości o 10% powierzchni obecnej |
| 2                    | jak wyżej                                                      | jak wyżej                                                                             | Degradacja lasów na 50% powierzchni         |
| 3                    | jak wyżej                                                      | jak wyżej                                                                             | Całkowita degradacja lasów                  |
| 4                    | jak wyżej                                                      | Spadek opadów o 20% sum obecnych                                                      | Wzrost lesistości o 10% powierzchni obecnej |
| 5                    | jak wyżej                                                      | jak wyżej                                                                             | Degradacja lasów na 50% powierzchni         |
| 6                    | jak wyżej                                                      | jak wyżej                                                                             | Całkowita degradacja lasów                  |

W poszczególnych miesiącach roku średnia temperatura może być obliczona wzorem (Kędziora i in. 1989):

$$T = t + 2 \cdot (\cos(\pi : 6 \cdot (i-1) + 2),$$

gdzie

$T$  – temperatura po podwojeniu koncentracji CO<sub>2</sub>,

$t$  – temperatura aktualna,

$i$  – kolejna liczba porządkowa miesiąca poczynając od stycznia.

Oceny długości okresu prac polowych i sezonu wegetacyjnego

Aktualnie długość okresu prac polowych (gdy temperatury dzienne przekraczają 2,5°C) waha się od około 215 w górach i 220 dni w północno-wschodniej części Polski do ponad 250 w południowo-zachodnich nizinnych regionach Polski (rys. 2, Molga 1986). W wyniku podwojenia stężenia CO<sub>2</sub> okres ten będzie wynosił od około 280 dni w górach i 310 na Suwalszczyźnie do pełnego roku w zachodniej części kraju (rys. 3). Przyrost długości okresu prac polowych wyniesie od 90 dni w tych regionach, w których jest on obecnie najkrótszy do 120 i więcej na tych terenach, gdzie jest on najdłuższy (rys. 4). Długość okresu wegetacyjnego (gdy temperatury dzienne przekraczają 5°C) waha się dzisiaj od około 185 dni w górach i poniżej 200 dni w północno-wschodnich regionach Polski

do około 220 w południowo-zachodniej części kraju (rys. 5, Molga 1986). W wyniku wzrostu temperatury długość tego okresu wzrośnie i wyniesie około 240 dni w górach i około 260 w północno-wschodniej Polsce do ponad 330 w szczecińskim i na Dolnym Śląsku (rys. 6). Przyrost długości okresu wegetacji waha się od około 60 dni na terenach najchłodniejszych, do ponad 120 w szczecińskim (rys. 7). Tak więc prawdopodobne zmiany klimatu różnicują Polskę pod względem klimatycznych warunków uprawy roślin jeszcze bardziej niż jest to obecnie. Dzisiaj różnica w długości okresu prac polowych i okresu wegetacji na obszarze całego kraju wynosi około miesiąca, natomiast w wyniku zmian klimatycznych wyniesie ona dwa miesiące.

#### Zmiany struktury bilansu cieplnego i wodnego w ciepłym półroczu

W strukturze bilansu cieplnego w aktualnych warunkach dyspozycyjna energia słoneczna (saldo promieniowania —  $R_n$ ) wykorzystywana jest głównie na parowanie wody ( $3/4$  wartości  $R_n$ ). Na ogrzewanie powietrza wykorzystywane jest około trzy razy mniej energii niż na parowanie wody. Saldo promieniowania ma podobne wartości w Wielkopolsce i w całej Polsce, które odpowiednio wynoszą  $83$  i  $84 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ . W strukturze bilansu wodnego widać zasadniczą różnicę pomiędzy Wielkopolską i całym krajem. W Wielkopolsce występuje deficyt wilgoci (parowanie jest większe o  $17 \text{ mm}$  od wielkości opadów, tab. 2), co świadczy, że w okresie wegetacyjnym musi obniżać się zwierciadło wód gruntowych, gdyż rośliny czerpią wodę na swoje potrzeby z zasobów wody gruntowej.

Wzrost temperatury powietrza, wzrost opadów i wzrost powierzchni leśnej (scenariusz 1) spowoduje wzrost salda promieniowania w Wielkopolsce i w Polsce odpowiednio o  $9$  i  $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (tab. 2). Wzrost ten wykorzystany będzie w równym stopniu na parowanie i na ogrzanie powietrza. Struktura bilansu cieplnego pozostanie prawie bez zmian. Wzrost parowania wyniesie około  $40 \text{ mm}$ , jednak wzrost opadów będzie większy i zniknie zjawisko deficytu opadów.

Jeżeli wraz ze wzrostem temperatury i opadów nastąpi zmniejszenie o połowę powierzchni leśnej, wtedy nastąpi spadek salda promieniowania i znaczny spadek strumienia utajonego ciepła parowania (scenariusz 2), podczas gdy strumień ciepła wykorzystany na ogrzewanie powietrza pozostanie bez zmian (tab. 2). Spadek parowania w stosunku do aktualnego wyniesie około  $10 \text{ mm}$  i przy wzroście opadów doprowadzi to do dodatniego bilansu wodnego (opad — parowanie) rzędu  $80 \text{ mm}$  w Wielkopolsce i  $130$  średnio w całym kraju. Liczby te świadczą o tym, że lokalnie, w terenach silnie urzeźbionych i słabo porośniętych wzrośnie groźba erozji wodnej, szczególnie w świetle przewidywanej zmiany struktury opadów (więcej będzie deszczy burzowych o dużym natężeniu opadu).

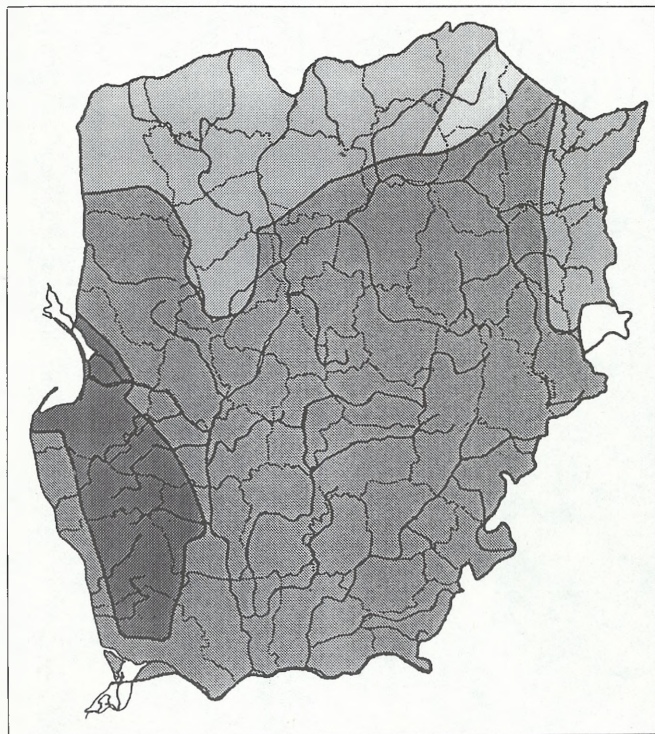
Całkowita degradacja szaty leśnej spowoduje znaczny spadek salda promieniowania (o  $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ), co odbije się głównie na zmniejszonym strumieniu ciepła parowania przy prawie nie zmniejszonym (jedynie o  $3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) strumieniu ciepła jawnego ogrzewającego powietrze. Degradacja szaty leśnej powoduje w strukturze bilansu cieplnego mały spadek udziału utajonego ciepła parowania (rubryka 6





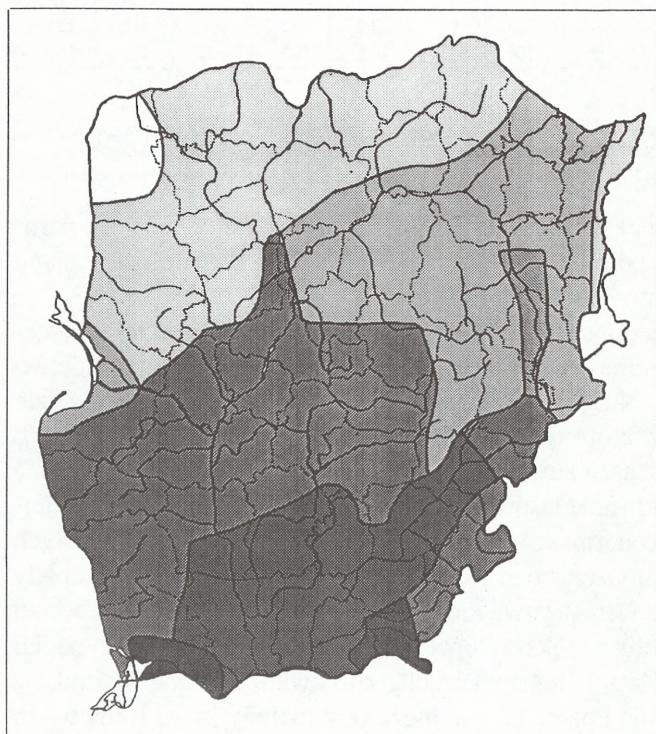
Rys. 2. Aktualna długość okresu prac polowych w Polsce. (Okres z temperaturą powietrza wyższą niż 2,5°C.)  
 Rys. 3. Prognozowana długość okresu prac polowych.



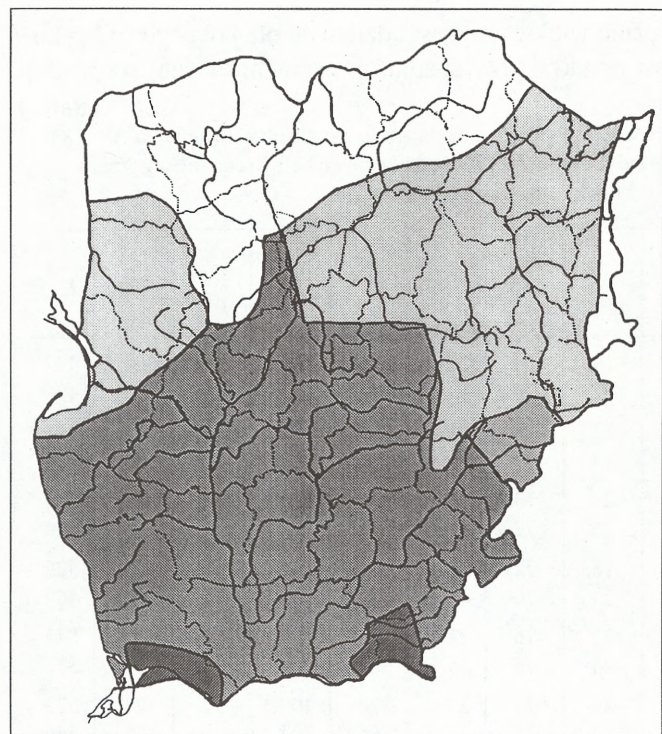


Rys. 4. Przyrost długości okresu prac polowych w wyniku podwojenia się obecnej zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu.  
 Rys. 5. Aktualna długość okresu wegetacyjnego w Polsce. (Okres z temperaturą powietrza wyższą niż 5°C).





Rys. 6. Prognozowana długość okresu wegetacyjnego.



Rys. 7. Przyrost długości okresu wegetacyjnego w wyniku podwojenia się obecnej zawartości CO<sub>2</sub> w powietrzu.

w tab. 3 — LE/Rn) i znacznie większy wzrost udziału ciepła jawnego (rubryka 7 w tab. 3 — S/LE). Wzrost opadów przy spadku powierzchni leśnej spowoduje

Tabela 2

Składowe bilansu cieplnego ( $W \cdot m^{-2}$ ) i bilansu wodnego (mm) dla okresu ciepłego (IV–IX) w Wielkopolsce (W) i w całym kraju (P), dla podanych w tabeli 1 scenariuszy zmian klimatycznych i lesistości kraju

| Scenariusz | Obszar | Rn | LE  | S   | LE/Rn | S/LE | OP  | ETR | Op-ETR | ETR/Op | ETP |
|------------|--------|----|-----|-----|-------|------|-----|-----|--------|--------|-----|
|            |        |    |     |     | %     | %    |     |     |        | %      |     |
| 0          | W      | 83 | -64 | -19 | -76   | 30   | 396 | 413 | -17    | 104    | 497 |
|            | P      | 84 | -62 | -21 | -74   | 34   | 444 | 402 | 42     | 91     | 490 |
| 1          | W      | 92 | -70 | -22 | -76   | 31   | 480 | 452 | 28     | 94     | 575 |
|            | P      | 92 | -69 | -24 | -75   | 35   | 528 | 445 | 83     | 84     | 578 |
| 2          | W      | 85 | -62 | -23 | -73   | 37   | 480 | 400 | 80     | 83     | 523 |
|            | P      | 85 | -61 | -24 | -72   | 39   | 528 | 394 | 134    | 75     | 546 |
| 3          | W      | 64 | -46 | -18 | -72   | 39   | 480 | 297 | 183    | 62     | 387 |
|            | P      | 65 | -46 | -19 | -70   | 41   | 528 | 297 | 231    | 56     | 462 |
| 4          | W      | 92 | -70 | -22 | -76   | 31   | 324 | 452 | -128   | 140    | 575 |
|            | P      | 92 | -69 | -24 | -75   | 35   | 365 | 445 | -80    | 122    | 578 |
| 5          | W      | 85 | -62 | -23 | -73   | 37   | 324 | 400 | -76    | 123    | 523 |
|            | P      | 85 | -61 | -24 | -72   | 39   | 365 | 394 | -29    | 108    | 546 |
| 6          | W      | 64 | -46 | -18 | -72   | 39   | 324 | 297 | 27     | 92     | 387 |
|            | P      | 65 | -46 | -19 | -70   | 41   | 365 | 297 | 68     | 81     | 462 |

Znaczenie symboli: W — Wielkopolska, P — Polska, Rn — saldo promieniowania, LE — strumień ciepła utajonego, wykorzystywanego na parowanie, S — strumień ciepła jawnego wykorzystywanego na ogrzanie atmosfery, OP — opady atmosferyczne skorygowane, ETR — ewapotranspiracja rzeczywista, ETP — ewapotranspiracja potencjalna

wzrost groźby erozji wodnej w całym kraju. Różnica pomiędzy opadami i parowaniem w ciągu ciepłego półrocza wyniosłaby tyle, ile obecnie wynosi w ciągu całego roku (około 200 mm — rubryka 10 w tab. 4).

Spadek opadów przy jednoczesnym zwiększeniu się powierzchni leśnej (scenariusz 4), spowoduje tak silne przesuszenie środowiska, że intensywne rolnictwo nie będzie mogło istnieć. Nie pomogą tutaj nic nawodnienia, gdyż nie będzie zimowych zapasów wody, które można by zmagazynować dla pokrycia letnich niedoborów. W tym scenariuszu zimowy bilans wodny wykazuje tylko niewielkie nadwyżki. Nawet zdegradowanie lasów na 50% obecnej powierzchni nie zmniejszy deficytów wodnych (scenariusz 5). Z drugiej jednak strony z dotychczasowych badań (Bac 1968) wiadomo, że wzrost powierzchni leśnej o 1% zwiększa opady o 5 mm rocznie. Tak więc wzrost powierzchni leśnej o 3% (10% z 28% obecnej powierzchni leśnej) mogłoby zwiększyć opady o 15 mm. Tak więc w przypadku realizacji scenariusza 4 lub 5 musi nastąpić całkowita zmiana warunków wilgotnościowych na terenie Polski, co być może postawiłoby przed rolnictwem trudności nie do pokonania.



Tabela 3

Składowe bilansu cieplnego ( $W \cdot m^{-2}$ ) i bilansu wodnego (mm) dla okresu zimnego (X-II) w Wielkopolsce (W) i w całym kraju (P), dla podanych w tabeli 1 scenariuszy zmian klimatycznych i lesistości kraju

| Scenariusz | Obszar | Rn | LE  | S  | LE   | S   | OP  | ETR | Op<br>-ETR | ETR | ETP |
|------------|--------|----|-----|----|------|-----|-----|-----|------------|-----|-----|
|            |        |    |     |    | Rn   | LE  |     |     |            | Op  |     |
|            |        |    |     |    | %    | %   |     |     |            | %   | %   |
| 0          | W      | 4  | -17 | 12 | -429 | -71 | 222 | 110 | 112        | 50  | 108 |
|            | P      | 5  | -15 | 8  | -368 | -54 | 262 | 96  | 166        | 37  | 98  |
| 1          | W      | 6  | -30 | 23 | -500 | -77 | 300 | 194 | 106        | 65  | 222 |
|            | P      | 6  | -29 | 21 | -556 | -72 | 340 | 188 | 152        | 55  | 208 |
| 2          | W      | 4  | -28 | 22 | -700 | -79 | 300 | 181 | 119        | 60  | 210 |
|            | P      | 5  | -27 | 20 | -609 | -74 | 340 | 175 | 165        | 51  | 196 |
| 3          | W      | 3  | -22 | 17 | -733 | -77 | 300 | 142 | 158        | 47  | 174 |
|            | P      | 4  | -21 | 16 | -660 | -76 | 340 | 135 | 205        | 40  | 162 |
| 4          | W      | 6  | -30 | 23 | -500 | -77 | 186 | 194 | -8         | 104 | 222 |
|            | P      | 6  | -29 | 21 | -556 | -72 | 217 | 188 | 29         | 87  | 208 |
| 5          | W      | 4  | -28 | 22 | -700 | -79 | 186 | 181 | 5          | 97  | 210 |
|            | P      | 5  | -27 | 20 | -609 | -74 | 217 | 175 | 42         | 81  | 196 |
| 6          | W      | 3  | -22 | 17 | -733 | -77 | 186 | 142 | 44         | 76  | 174 |
|            | P      | 4  | -21 | 16 | -660 | -76 | 217 | 135 | 82         | 62  | 162 |

Znaczenie symboli takie jak w tabeli 2

### Półrocze zimne (październik-marzec)

Charakterystyczną cechą tego okresu jest bardzo małe saldo promieniowania, którego wartości są bardzo podobne dla wszystkich scenariuszy. Wysokie parowanie potencjalne (2 razy większe niż obecnie) powoduje również dwukrotny wzrost parowania rzeczywistego, co wymaga od 5 do 7 razy więcej energii niż to jest dostępne z salda promieniowania (tab. 3). Te niedobory energetyczne pokrywane są z ciepła napływającego z masami atmosferycznymi; strumień jawny (S) skierowany jest ku powierzchni czynnej (wartości dodatnie w rubr. 5, tab. 3). Jawny strumień ciepła wzrośnie w 1 i 2 scenariuszu od 2 do 2,5 razy w stosunku do wartości aktualnych. Duże wartości parowania powodują, że pomimo wzrostu opadów (w 2 pierwszych scenariuszach) retencja wodna (opad OP — parowanie rzeczywiste ETR) praktycznie się nie zmienia w stosunku do wartości aktualnych. Tylko w scenariuszu, gdy następuje pełna degradacja lasów retencja wzrasta.

We wszystkich scenariuszach przewidujących zmniejszenie się opadów, bilans wodny jest bardzo napięty, co bardzo ogranicza pole manewru w gospodarce wodnej w rolnictwie. Niemożliwe będzie utrzymywanie intensywnego rolnictwa opartego na nawodnieniach, gdyż nie będzie zimowych rezerw wody, które pozwoliłyby napełnić zbiorniki retencyjne wodą wykorzystywaną latem. Wielkopolska

Tabela 4

Składowe bilansu cieplnego ( $W \cdot m^{-2}$ ) i bilansu wodnego (mm) dla okresu rocznego w Wielkopolsce (W) i w całym kraju (P), dla podanych w tabeli 1 scenariuszy zmian klimatycznych i lesistości kraju

| Scenariusz | Obszar | Rn | LE  | S  | LE   | S  | OP  | ETR | Op<br>-ETR | ETR | ETP |
|------------|--------|----|-----|----|------|----|-----|-----|------------|-----|-----|
|            |        |    |     |    | Rn   | LE |     |     |            | Op  |     |
|            |        |    |     |    | %    | %  |     |     |            | %   |     |
| 0          | W      | 43 | -40 | -4 | -93  | 10 | 612 | 515 | 97         | 84  | 600 |
|            | P      | 44 | -38 | -7 | -86  | 18 | 707 | 495 | 212        | 70  | 553 |
| 1          | W      | 49 | -50 | 1  | -102 | -2 | 780 | 644 | 136        | 83  | 780 |
|            | P      | 49 | -49 | -1 | -100 | 2  | 869 | 629 | 240        | 72  | 745 |
| 2          | W      | 45 | -45 | 0  | -100 | 0  | 780 | 580 | 200        | 74  | 744 |
|            | P      | 45 | -44 | -2 | -98  | 5  | 869 | 566 | 303        | 65  | 705 |
| 3          | W      | 34 | -34 | -1 | -100 | 3  | 780 | 438 | 342        | 56  | 624 |
|            | P      | 34 | -33 | -2 | -98  | 6  | 869 | 429 | 440        | 49  | 592 |
| 4          | W      | 49 | -50 | 1  | -102 | -2 | 504 | 644 | -140       | 128 | 780 |
|            | P      | 49 | -49 | -1 | -100 | 2  | 580 | 629 | -49        | 108 | 745 |
| 5          | W      | 45 | -45 | 0  | -100 | 0  | 504 | 580 | -76        | 115 | 744 |
|            | P      | 45 | -44 | -2 | -98  | 5  | 580 | 566 | 14         | 98  | 705 |
| 6          | W      | 34 | -34 | -1 | -100 | 3  | 504 | 438 | 66         | 87  | 624 |
|            | P      | 34 | -33 | -2 | -98  | 6  | 580 | 429 | 151        | 74  | 592 |

Znaczenie symboli takie jak w tabeli 2

sce zagraża susza uniemożliwiająca rozwój nawet ekstensywnego rolnictwa. W tych warunkach można przewidywać rozwój półpustynnych zespołów roślinności.

### Okres roczny

W okresie rocznym charakterystyczną cechą struktury bilansu cieplnego jest to, że we wszystkich scenariuszach (tab. 4) saldo promieniowania prawie całkowicie wykorzystywane jest na parowanie. W najoptymistyczniejszym scenariuszu 1 dyspozycyjne zasoby wody są na tyle duże, że mogą zabezpieczyć potrzeby wodne wszystkich gałęzi gospodarki narodowej. Przy tym groźba erozji nie jest istotna. Jednak przy wzroście opadów i całkowitej degradacji lasów powstanie poważne zagrożenie erozją wodną. W wypadku potęgującego się przesuszenia kraju zasoby wodne będą poważnym czynnikiem nie tylko ograniczającym rolnictwo, ale i cały rozwój gospodarczy kraju. Jedynie w wypadku zupełnego wylesienia (scenariusz 6) wystąpi niewielka nadwyżka opadów nad parowaniem.

Zasadniczym wnioskiem wypływającym z powyższej analizy jest konieczność opracowania już dzisiaj różnych strategii przystosowania gospodarki narodowej do różnych wariantów przewidywanych zmian. Pozwoli to na uniknięcie zaskoczenia nie przewidzianymi klimatycznymi sytuacjami. W przygotowywanych



strategiach ważną rolę powinien odgrywać monitoring przemian, pozwalający na odpowiednio wczesne rozpoznanie nasilającej się tendencji zmian. Umożliwi to odpowiednio wczesną restrukturyzację rolnictwa oraz innych działów gospodarki kraju, umożliwiając optymalizację nakładów i środków. W sytuacji zaskoczenia przez niekorzystny rozwój warunków klimatycznych poniesione będą znacznie większe koszty.

Nawet w przypadku wzrostu ilości opadów ze względu na ocieplenie klimatu należy spodziewać się daleko idących zmian w strukturze roślin uprawnych. Przykładowo, jeżeli w Polsce, zgodnie z prognozą Ryszkowskiego i in. (1991), zapanuje w 2050 roku klimat podobny do obecnie panującego w południowych Morawach, to można się spodziewać, że kukurydza będzie dojrzewała w granicach Polski, a udział winnic zacznie być znaczący w strukturze roślin uprawowych. Może to spowodować daleko idące zmiany struktury zasiewów, na przykład radykalne zmniejszenie się areалу upraw żyta czy ziemniaków lub zastąpienie odmian obecnie uprawianych przez odmiany bardziej dostosowane do cieplejszych warunków.

Duże znaczenie będzie miało wydłużenie okresu wegetacji roślin. W zależności od rozkładu warunków temperaturowo-wilgotnościowych będzie można używać dwa plony w ciągu roku. Z pewnością wzrośnie możliwość uprawy przed- lub poplonów co wpłynie na poprawę zasobów pasz dla hodowanych zwierząt oraz będzie sprzyjało zachowaniu zasobów próchnicy.

## ZAKOŃCZENIE

Przedstawiony przegląd wyników badań na temat relacji pomiędzy rolnictwem a zmianami globalnymi wywołanymi wzrostem koncentracji gazów szklarniowych prowadzi do następujących konkluzji:

a) intensyfikacja produkcji rolnej przyczynia się do wzrostu koncentracji gazów szklarniowych w atmosferze. Choć oddziaływania rolnictwa są mniej intensywne niż przemysłu, są one jednak znaczące. Dlatego w strategii ochrony środowiska należałoby podjąć badania pozwalające opracować technologie ograniczające emisje gazów szklarniowych z agroekosystemów. Na przykład ograniczenie intensywności procesów nityfikacji może zmniejszyć emisje podtlenku azotu z gleby. Niezmiernie ważne znaczenie dla ograniczania emisji  $\text{CO}_2$  będzie miało zalesienie mniej żyznych gleb, nasycenie zmianowań roślin uprawnych przed- i poplonami, wprowadzanie bezorkowej uprawy, zaniechanie melioracji i uprawy gleb hydromorficznych i tym podobne. Przyszłe badania powinny być ukierunkowane na pełniejsze zrozumienie odkształceń w cyklach obiegu materii wywołanych przez działalność rolniczą przykładowo na wymianie  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$  pomiędzy glebą a atmosferą celem opracowania technologii upraw minimalizujących ich emisje.

b) Jak wykazują badania, reakcja fotosyntezy na wzrost  $\text{CO}_2$  następuje w okresie paru sekund, natomiast procesy adaptacyjne do wzrostu  $\text{CO}_2$  pojawiają się dopiero po dniach lub paru tygodniach (Mooney i in. 1991), a zwiększenie zaś biomasy następuje po upływie tygodni lub paru miesięcy. Oddziaływanie jednego czynnika w wyniku zjawisk synergizmu i kompensacji może być zmodyfikowane w terenie w porównaniu do rezultatów osiągniętych w laboratorium. Dlatego badania laboratoryjne, pozwalające zrozumieć powiązania między różnymi procesami, powinny być weryfikowane w warunkach terenowych, aby można było poprawnie wnioskować o ich znaczeniu dla produkcji biomasy w agroekosystemach. Systemowy, ekologiczny sposób analizy warunków rozwoju roślin powinien być wykorzystywany w rolnictwie szerzej niż ma to miejsce obecnie.

c) Należy liczyć się z wzrastającą częstością ekstremalnych sytuacji klimatycznych w miarę pogłębiania się efektu szklarniowego.

d) Wzrost efektu szklarniowego spowoduje, zarówno przez bezpośrednie jak i pośrednie oddziaływania, zmiany składu gatunkowego lub odmianowego uprawianych roślin. Nie należy jednak oczekiwać wzrostu plonów. Zarówno konieczność uprawy nowych odmian roślin, lepiej przystosowanych do panujących warunków pogodowych, jak i wzrost intensywności porażenia roślin przez patogeny i szkodniki będzie wymagał znaczącej reorganizacji technologii uprawy. Decydujące znaczenie dla produkcji rolnej będzie miało to, czy efekt szklarniowy spowoduje przesuszenie, czy też większe uwilgotnienie środowiska. W przypadku realizacji scenariusza, w którym nastąpi zmniejszenie opadów, należy liczyć się ze wzrostem kosztów związanych z nawadnianiem pól uprawnych, a w skrajnych scenariuszach z całkowitą przebudową rolnictwa, przewidywane zmiany warunków środowiskowych mogą być w dużym stopniu modyfikowane działalnością człowieka. Prognoza nie uwzględniająca decydującej roli rolników może prowadzić do zupełnie błędnych przypuszczeń.

## AGRICULTURE AND GREENHOUSE EFFECT

### Summary

Conversion of forests into cultivated fields as well as soil tillage activities increase the net release of greenhouse gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ). In the case of a forest clearing the wood is burnt or decomposed, and releases the carbon accumulated in vegetation biomass. Tillage, by changing soil aeration, moisture and temperature conditions enhances the decomposition of organic matter and release of  $\text{CO}_2$ . Drainage and cultivation of wetlands, expansion of paddy rice cultivation and animal husbandry also provide important inputs of greenhouse gases into the atmosphere. Although industrial impacts on the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere are the most important nevertheless agricultural activities are second in rank in the anthropogenic impacts on climate global changes. Thus, when elaborating programs for the control of greenhouse effects, proper measures for minimizing negative side effects of agriculture should also be included. These are: afforestation of marginal lands, no-till agriculture, control of nitrification processes and others.



Many laboratory experiments have shown that elevated concentrations of CO<sub>2</sub> enhance photosynthesis and biomass production rates. But a transfer of these results into field conditions will be unwarranted. Responses of biomass production to elevated CO<sub>2</sub> concentrations may be limited by lack of water or nutrients or by unfavourable temperatures. There are also indications that pests, pathogens or weeds may limit yields more intensively at elevated temperatures, especially if precipitation will increase too. A few observations on responses of total plant communities to elevated CO<sub>2</sub> concentration did not support the conclusion that the production rate of plant biomass will increase because of the direct effect of rising CO<sub>2</sub> concentration.

Taking the estimates of temperature increase caused by the doubling concentrations of greenhouse gases predicted by the general circulation model (Jäger 1986) six scenarios of weather change in Poland were evaluated. In scenarios 1, 2 and 3 it is assumed that annual precipitation will increase by 23 per cent in comparison to present conditions (Jäger 1986). In scenarios 4, 5 and 6 it is assumed that annual precipitation will decrease by 20 per cent. In each class of increasing or decreasing precipitation it is assumed that afforestation of the Poland till middle of XXI century will increase by 10 per cent, or will decrease by 50 per cent, or the area of country will be completely deforested because of air pollution. The methods of weather change predictions based on heat and water balances transformations were described in details by Kędziora et al. (1989), Ryszkowski et al. (1991).

Because of greenhouse effect the length of farming season (daily temperature above 2.5°C) will increase by 76–90 days in eastern Poland, and in the north-west part of Poland by 121–135 days providing an opportunity to work in the field for the whole year. The plant growing season (> 5°C) will also increase substantially.

The analysis of various scenarios indicates that the decrease of precipitation and the decrease of afforestation will evoke serious limitations to agriculture. Thus, during a cold season, very high potential evapotranspiration will also cause an increase of real evapotranspiration and practically no soil moisture storage will occur. During the whole year practically all net radiation balance will be used for evapotranspiration. Such a situation will create a challenge to agriculture. Thus, if precipitation will decrease in Poland as the effect of global climate changes the agriculture development will be seriously limited. If precipitation increases agriculture production may increase too, if not hampered by impacts of pests diseases or weeds. Taking these scenarios into account one can presume that agriculture will undergo substantial changes in the near future.

#### LITERATURA

- Acock B., Allen L. H. 1985. *Crop responses to elevated carbon dioxide concentration*. Springfield, 55–97. [W:] *Direct effect of increasing carbon dioxide on vegetation* (red.) Strain B. R., Cure J. D. U.S. Department of Energy.
- Aselmann I., Crutzen P. J. 1990. *Global seasonality, net primary productivity, and estimated methane emissions*. 441–449. [W:] *Soils and the greenhouse effect* (red.) Bouwman A. F. Wiley and Sons, Chichester.
- Bac S. 1968. *Rola lasu w bilansie wodnym Polski*. Folia Forestalia Polonica, A14, 5–65.
- Bazzaz F. A. 1990. *The response of natural ecosystems to the rising global CO<sub>2</sub> levels*. Ann. Rev. Ecol. Syst., 21, 167–196.
- Bazzaz F. A., Garbutt K., Williams W. E. 1985. *Effect of increased atmospheric carbon dioxide concentration on plant communities*. 155–170. [W:] *Direct effect of increasing carbon dioxide on vegetation* (red.) Strain B. R., Cure J. D. U.S. Department of Energy. Springfield.
- Bergthorsson P., Björnsson H., Dyrmondsson O., Gudmundsson B., Helgaottir A., Jonmundsson J.V. 1988. *The effect of climatic variations on agriculture in Iceland*. 383–509.

- [W:] *The impact of climatic variations on agriculture* (red.) Parry M. L., Carter T. R., Konsin N. T. Kluwer, Dordrecht, 383–509.
- Bolin B., Cook R. B. (red.) 1983. *The major biogeochemical cycles and their interactions*. Wiley, New York 532 s.
- Bouwman A. F. 1990. *Exchange of greenhouse gases between terrestrial ecosystems and the atmosphere*. 61–127. [W:] *Soils and the greenhouse effect*: Wiley and Sons, Chichester.
- Bouwman A. F. (red.) 1990. *Soils and the greenhouse effect*. Wiley and Sons, Chichester 575 s.
- Brundtland G. H. (red.) 1987. *Our common future*. Oxford Univ. Press, Oxford 400 s.
- Decker W. L., Jones V., Achutun R. 1985. *The impact of CO<sub>2</sub> — induced climate change on U.S. agriculture*. 69–93. [W:] *Characterization of information requirements for studies of CO<sub>2</sub> effects: water resources, agriculture, fisheries, forests and human health* (red.) White M. R. U.S. Department of Energy, Springfield.
- Freedman B. 1992. *Environmental ecology*. Academic Press, New York. 424 s.
- Gołębiowska J., Ryszkowski L. 1977. *Energy and carbon fluxes in soil compartments of agroecosystems*. Ecol. Bull. (Stockholm), 25, 274–283.
- Hekstra G. P. 1991. *Climatic change and land use impact in Europe*. 177–207. [W:] *Land use changes in Europe* (red.) Brouwer F. M., Thomas A. J., Chadwick M. J., Kluwer, Dordrecht.
- Hendrey G. R. 1992. *Global greenhouse studies: need for a new approach to ecosystem manipulation*. Critical Reviews in Plant Sciences, 11, 61–74.
- Houghton R. A., Hobbie J. E., Melillo J. M., Moore B., Peterson B. J., Shafer G. R., Woodwell G. M. 1983. *Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1990: a net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere*. Ecological Monographs 53: 253–262.
- Jäger J. 1986. *Some notes of the preparation of climate scenarios. Note for the IIASA case study on future environments for the European continent*. International Institute for Applied Systems Analysis, Luxemburg, Austria.
- Kaszubiak H., Kaczmarek W. 1985. *Differentiation of bacterial biomass in croplands and grasslands*. Intecol Bulletin, 12, 29–37.
- Ketner P. 1990. *Will there be a weed problem as a result of climate change*. 18–19. [W:] *The greenhouse effect and primary productivity* (red.) Goudriaan J., van Keulen H., van Laar H. H., Pudoc, Wageningen.
- Kędziora A., Olejnik J., Ryszkowski L. 1989. *Spółeczno-ekonomiczne oraz ekologiczne czynniki „zdrowego” rozwoju rolnictwa w Polsce. I. Ekologiczne czynniki*. Wieś i rolnictwo, 65, 9–34.
- Lange O. L., Beyschlag W., Tenhunen J. D. 1987. *Control of leaf carbon assimilation input of chemical energy into ecosystem*. 149–163. [W:] *Potentials and limitations of ecosystem analysis* (red.) Schulze E. D., Zwolfer H. Z. Springer Verlag, Berlin.
- Long S. P. 1991. *Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations: Has its importance been underestimated?* Plant, Cell and Environment, 14, 729–739.
- Lovelock J. 1989. *The ages of Gaia*. Oxford Univ. Press Oxford 252 s.
- Lugo A. E., Brown S., 1986. *Steady state terrestrial ecosystems and the global carbon cycle*. Vegetation, 68, 83–90.
- Machta L. 1973. *Prediction of CO<sub>2</sub> in the atmosphere*. 21–31. [W:] *Carbon and the biosphere* (red.) Woodwell G. M., Pecan E. V.). U.S. Atomic Energy Commission, Springfield.
- McGill W. B., Hunt H. W., Woodmansee R. G., Reuss J. O. 1981. *Phoenix, a model of the dynamics of carbon and nitrogen in grass land* (red.) Clark F. E., Rosswall T., Ecol. Bull. (Stockholm), 33, 48–115.
- Molga M. 1986. *Meteorologia rolnicza*. PWRiL, Warszawa 492 s.
- Mooney H. A., Drake B. G., Luxmoore R. J., Oechel W. C., Pitelka L. F. 1991. *Predicting ecosystem responses to elevated CO<sub>2</sub> concentrations*. BioScience, 41, 96–104.



- Oeschger H., Siegenthaler U., Schotterer K., Gugliemann A. 1975. *A box diffusion model to study the carbon dioxide exchange in nature*. Tellus, 27, 168–192.
- Overdieck D. 1990. *Effects of elevated CO<sub>2</sub>-concentration levels on nutrient contents of herbaceous and woody plants*. [W:] *The greenhouse effect and primary productivity in European agroecosystems* (red. Groudriaan J., van Keulen H., van Laar H. H.) Pudoc, Wageningen 31–37.
- Parry M. L., Carter T. R. 1991. *Climatic changes and land use potential in Europe*. 209–231. [W:] *Land use changes in Europe* (red.) Brouwer F. M., Thomas A. J., Chadwick M. J. Kluwer, Dordrecht.
- Romer S. 1949. *Regiony klimatyczne w Polsce*. Prace Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego. Seria B. N° 16. Wrocław.
- Ryszkowski L. 1984. *Primary production in agroecosystems*. 77–94. Options mediterraneennes, International Centre for Advanced Mediterranean Agronomic Studies, Zaragoza.
- Ryszkowski L. 1988. *Agroekosystemowe zasady rozwoju rolnictwa*. Post. Nauk Rol., 5/6, 3–18.
- Ryszkowski L., Bałazy S. 1991. *Strategia ochrony żywych zasobów przyrody w Polsce*. Zakład Badań Środowiska Rolniczego i Leśnego PAN, Poznań, 95 s.
- Ryszkowski L., Kędziora A., Olejnik J. 1991. *Potential effects of climate and land use changes on water balance structure in Poland*. [W:] *Land use changes in Europe* (red.) Brouwer F. M., Thomas A. J., Chadwick M. J., Kluwer, Dordrecht. 253–274.
- Schlesinger W. H. 1986. *Changes in soil carbon storage and associated properties with disturbance and recovery*. 196–220. [W:] *The changing carbon cycle* (red.) Trabalka J. R., Reichle D. E., Springer Verlag, New York.
- Schutz H., Seiler W., Rennenberg H. 1990. *Soil and land use related sources and sinks of methane (CH<sub>4</sub>) in the context of the global methane budget*. 267–285. [W:] *Soils and the greenhouse effect* (red.) Bouwman A. F., Wiley and Sons, Chichester.
- Scott M. J., Rosenberg N. J., Edmonds J. A., Cushman R. M., Darwin R. F., Yohe G. W., Liebetran A. M., Hunsaker C. T., Bruns D. A., De Angelis D. L., Hales J. M. 1990. *Consequences of climatic change for the human environment*. Climate Research, 1, 63–79.
- Siegenthaler U., Oeschger H. 1978. *Predicting future atmospheric carbon dioxide levels*. Science, 199, 388–394.
- Sinha S. K. 1991. *Impact of climate change on agriculture. A critical assessment*. [W:] *Climate change: science, impact and policy* (red.) Jager J., Ferguson H. L., Cambridge Univ. Press, Cambridge 99–107.
- Strain B. R. 1985. *Background on the response of vegetation to atmospheric carbon dioxide enrichment*. 3–10. [W:] *Direct effects of increasing carbon dioxide on vegetation* (red.) Strain B. R., Cure J. D., U.S. Department of Energy, Springfield.
- Svensson B. H., Soderlund R. (red.) 1975. *Nitrogen, phosphorus and sulphur — global cycles*. Ecol. Bull. (Stockholm) 22, 192 s.
- Voroney R. P., van Veen J. A., Paul E. A. 1981. *Organic C dynamics in grassland soils 2. Model validation and simulation of the long-term effects of cultivation and rainfall erosion*. Can. J. Soil Sci., 61, 211–224.
- Whittaker R. H., Likens G. E. 1973. *Carbon in the biota*. 281–302. [W:] *Carbon and the biosphere* (red.) Woodwell G. M., Pecan E. V., U.S. Atomic Energy Commission, Springfield.