

STUDIA I RAPORTY IUNG - PIB

ZESZYT 7

2007

**Tomasz Stuczyński, Jerzy Kozyra, Artur Łopatka, Grzegorz Siebielec, Jan Jadczyszyn,
Piotr Koza, Andrzej Doroszewski, Rafał Wawer, Eugeniusz Nowocień**

*Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

**PRZYRODNICZE UWARUNKOWANIA PRODUKCJI ROLNICZEJ
W POLSCE***

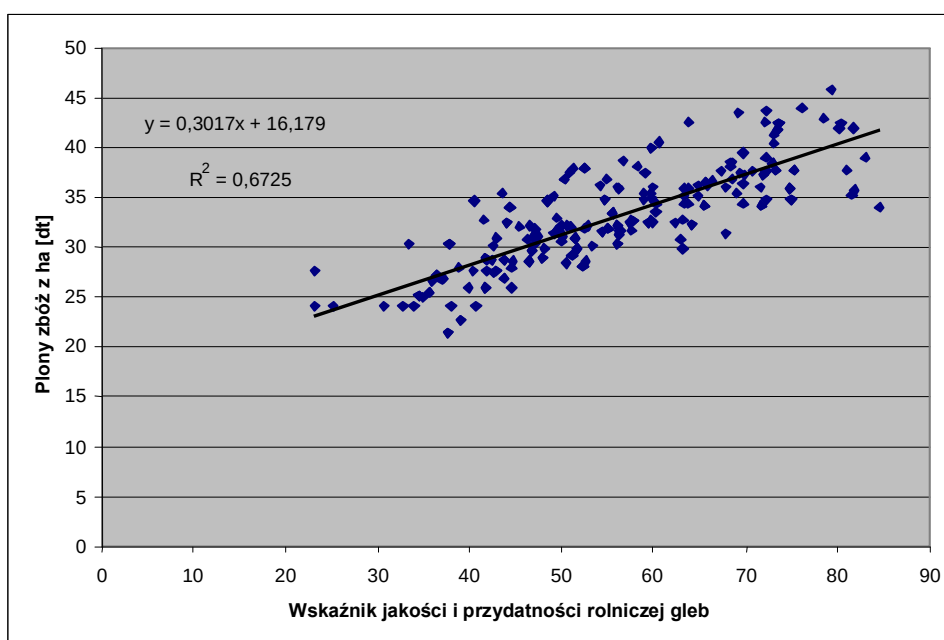
Wstęp

Obserwowane w ostatniej dekadzie zmiany klimatu prowadzą do przekształceń warunków siedliskowych, wymuszając poszukiwanie rozwiązań adaptacyjnych w różnych działach gospodarki, w tym zwłaszcza w rolnictwie. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera bieżąca ocena zmian warunków siedliskowych i zagrożeń procesami degradacji, wynikającymi ze wzrostu częstości suszy powodowanej ujemnym klimatycznym bilansem wodnym. Konieczne jest poszukiwanie nowych, bardziej dynamicznych metod waloryzacji przestrzeni, umożliwiających dokonywanie odpowiednich korekt wskaźników wyceny poszczególnych elementów decydujących o jakości siedliska. W opracowaniu przedstawiono nowe metody podejścia do analizy ryzyka spadku plonu oraz założenia budowy systemów monitorowania zmian potencjału produkcyjnego przestrzeni rolniczej w perspektywie zmian klimatu. Prezentowane podejście do oceny warunków przyrodniczych opiera się na metodach modelowania i systemach informacji geograficznej (GIS), umożliwiających integrację wielu warstw informacji o przestrzeni i dokonywanie złożonych wielokryterialnych analiz jej stanu. Przedstawione w opracowaniu warstwy informacji i modele są częścią zintegrowanego systemu informacji o rolniczej przestrzeni produkcyjnej Polski (ZSIRPP). Część omawianych analiz nawiązuje do przyjętego w 2006 roku dokumentu Europejskiej Ramowej Strategii Ochrony Gleb. Strategia ta zakłada zobowiązanie do wyznaczania obszarów gleb zagrożonych utratą podstawowych funkcji gleb w wyniku różnych procesów degradacji. Do zjawisk o szczególnym znaczeniu, z punktu widzenia zachowania przyrodniczych zasobów rolnictwa, zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego oraz zachowania równowagi agroekosystemów zalicza się między innymi: erozję, degradację glebowej materii organicznej, zagęszczenie gleb oraz zanieczyszczenia.

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 1.1 w programie wieloletnim IUNG - PIB

Waloryzacja rolniczej przestrzeni produkcyjnej

W stosowanym w Polsce od lat 70. ubiegłego wieku systemie waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej pod uwagę brane są statyczne wskaźniki oceny poszczególnych elementów siedliska, takie jak: jakość i przydatność gleb, wilgotność gleb, rzeźba terenu oraz agroklimat. Waloryzację warunków przyrodniczych opracowano na podstawie ilościowych zależności pomiędzy plonem a jakością siedliska i klimatem (34). Wycenę warunków glebowo-przyrodniczych opracowaną metodami analizy statystycznej zagregowano do poziomu gmin, obliczając ogólny wskaźnik waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej (WWRPP) jako miarę potencjału produkcyjnego siedliska. Wagi przyjęte w waloryzacji dla poszczególnych czynników są odzwierciedleniem ich rangi w kształtowaniu plonu (tab. 1). W waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej szczególne znaczenie mają warunki glebowe; w funkcji samego tylko wskaźnika jakości i przydatności gleb można wyjaśnić około 70% obserwowanej zmienności plonów (rys. 1). Wpływ pozostałych czynników jest znacznie mniejszy i wynosi łącznie około 30%. Udział wskaźnika cząstkowego agroklimatu ujmującego cały kompleks czynników klimatycznych zawiera się w przedziale 1-15 pkt., wskaźnika warunków wodnych w przedziale 1-5 pkt., a rzeźby terenu 0,1-5 pkt. (tab. 1).



Rys. 1. Zależność regresyjna pomiędzy wskaźnikiem jakości i przydatności gleb a średnim plonem 4 zbóż w gminach woj. dolnośląskiego

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 1

Przedziały wartości WWRPP i wskaźników cząstkowych

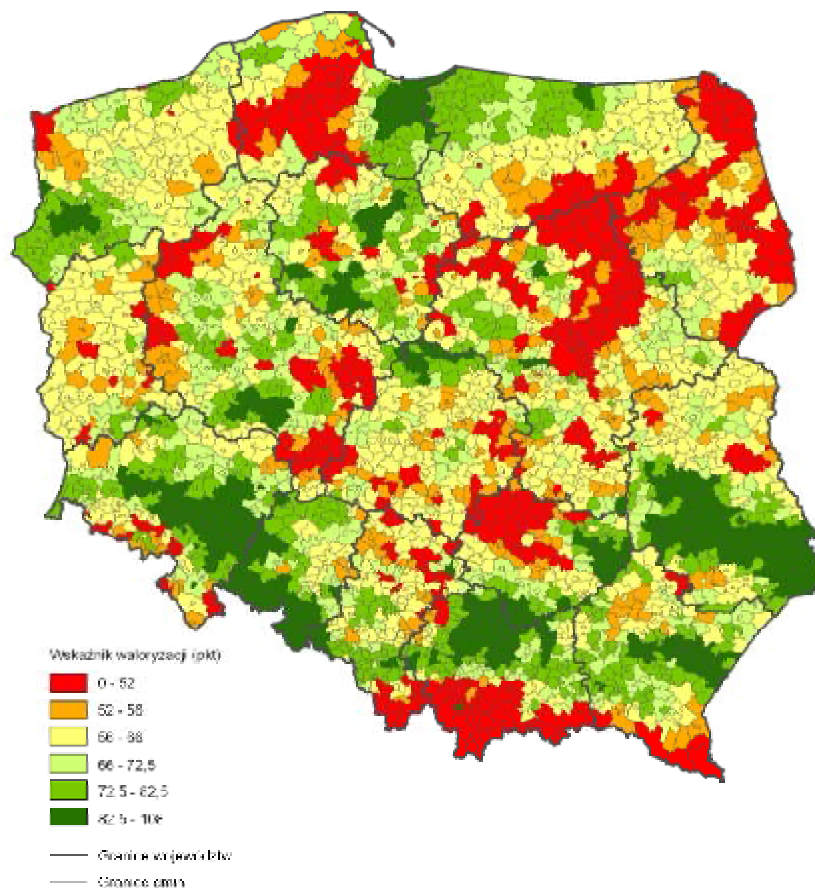
Wskaźnik cząstkowy	Zakres punktów
Jakość i przydatność rolnicza gleb	18-95
Agroklimat	1-15
Rzeźba terenu	0,1-5
Warunki wodne	1-5
Razem WWRPP	31-120

Źródło: Opracowanie własne.

Zróznicowanie naturalnego potencjału produkcyjnego w skali kraju wynika z przestrzennej zmienności ukształtowania terenu, pokrywy glebowej oraz opadów i temperatury. Obecnie, dysponując numerycznymi warstwami informacji charakteryzującymi poszczególne cechy siedliska można przeprowadzać obliczenia wskaźnika waloryzacji dla dowolnych obszarów – obrębu geodezyjnego, zlewni, regionów funkcjonalnych itp. (23).

Wartość wskaźnika waloryzacji zawiera się w przedziale od 31 pkt. dla siedlisk najuboższych i najmniej przydatnych dla rolnictwa do 120 pkt. dla siedlisk najlepszych, o optymalnych warunkach dla wzrostu i rozwoju roślin (tab. 1).

Średnia wartość WWRPP dla Polski wynosi 66,6 pkt. (tab. 2); przestrzenny rozkład wskaźnika w ujęciu dla gmin przedstawiono na rysunku 2. Największe ograniczenia w rozwoju produkcji roślinnej występują na obszarach o wartości wskaźnika poniżej 52 pkt. Obejmują one zarówno tereny typowo górskie, w obrębie których ograniczenia wynikają głównie z ukształtowania rzeźby terenu i klimatu oraz tereny nizinne, gdzie podstawowe ograniczenia wiążą się z małą pojemnością wodną oraz ograniczoną naturalną zasobnością gleb w składniki pokarmowe. Największe skupiska terenów mało przydatnych dla rolnictwa występują w województwach podlaskim, mazowieckim i pomorskim. Województwo podlaskie posiada najniższy wskaźnik waloryzacji w Polsce, wynoszący 55,0 pkt. (tab. 2). Niska jakość przestrzeni produkcyjnej ogranicza nie tylko dobór i plony roślin uprawnych, ale ma szereg niekorzystnych następstw w wymiarze gospodarczym i środowiskowym, prowadzi bowiem potencjalnie do odłogowania gruntów i degradacji krajobrazu. Wytworzone z piasków gleby lekkie o dużej przepuszczalności i małej retencji stają się bardzo podatne na suszę glebową. Zjawisko to jest szczególnie dotkliwe na obszarach o tzw. opadowym typie gospodarki wodnej, gdzie poziom wody gruntowej występuje poniżej zasięgu systemu korzeniowego roślin, a podsiąk kapilarny nie ma praktycznego znaczenia. O wysokości plonu w takich warunkach decyduje wielkość i rozkład opadów atmosferycznych w sezonie wegetacyjnym i ilość wody zatrzymanej w profilu glebowym siłami kapilarnymi. Zdolność retencionowania wody w profilu zależy od ich uziarnienia; ilość wody odpowiadająca połowej pojemności wodnej (PPW) w profilu gleby wytworzonej z piasku gliniastego mocnego (pgm) jest prawie dwukrotnie większa w porównaniu



Rys. 2. Wartość wskaźnika waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej według gmin
Źródło: Opracowanie własne.

z glębą wytworzoną z piasku luźnego (pl), a pojemność wodna gleby wytworzonej z gliny ciężkiej (gc) jest prawie trzykrotnie większa (20, 35). Wyraźna w ostatnich latach tendencja ocieplania się klimatu, wzrostu średniej rocznej temperatury i zwiększania ujemnego bilansu klimatycznego może istotnie zwiększyć ryzyko wystąpienia suszy glebowej, zwłaszcza na glebach lekkich. Do obszarów bardzo narażonych na suszę należy Wielkopolska i znaczna część Podlasia.

Istotnym czynnikiem ograniczającym produkcję rolniczą, nie ujętym bezpośrednio w waloryzacji, jest zakwaszenie gleb. Z badań chemizmu gleb Polski przeprowadzonych w latach 90. ubiegłego wieku (29) wynika, że 26,2% gleb użytków rolnych w Polsce wykazuje bardzo kwaśny odczyn (tab. 3, rys. 3). Utrzymanie takiego stanu w dłuższym czasie prowadzić będzie do uruchamiania glinu i metali śladowych w środowisku, ograniczenia pobierania składników mineralnych przez rośliny, a w konsekwencji do zwiększania ryzyka przemieszczania biogenów do środowiska wodnego.

Tabela 2

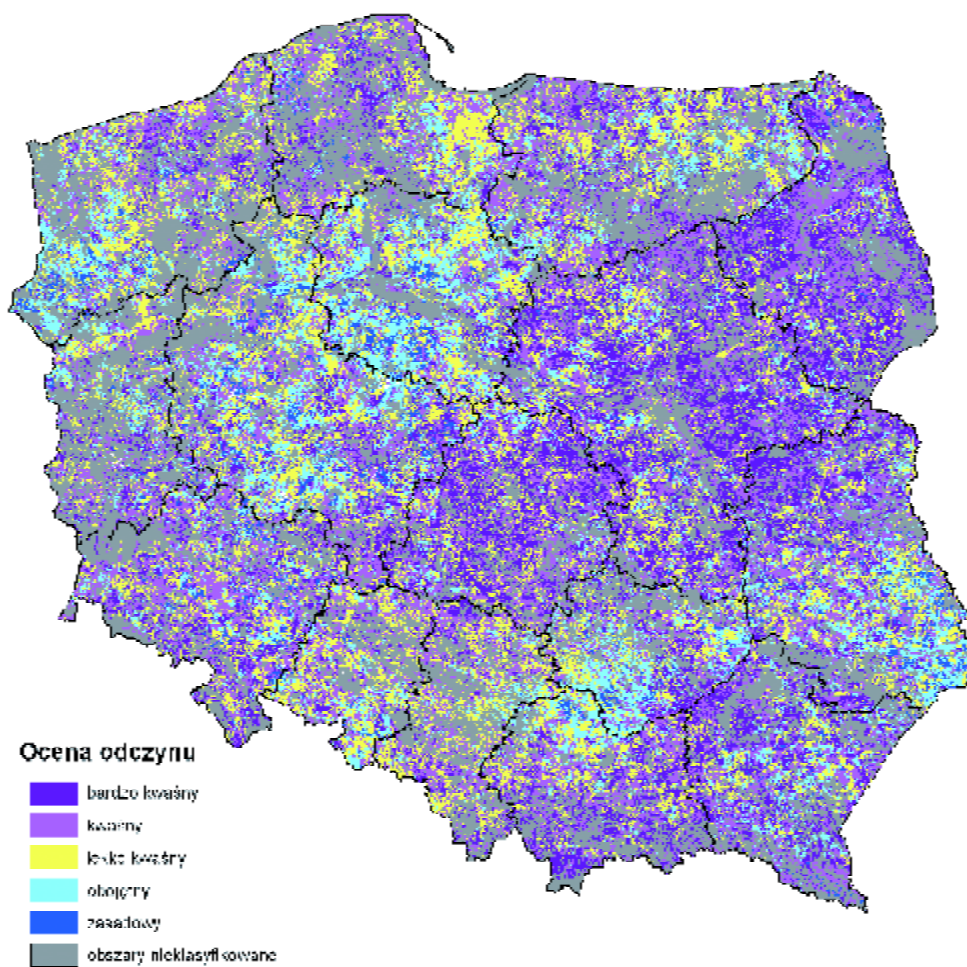
Częstkowe wskaźniki waloryzacji warunków siedliskowych oraz ogólny wskaźnik jakości rolniczej przestrzeni produkcyjnej (WWRPP) w województwach

Lp.	Województwo	Wskaźnik bonitacji				Razem WWRPP
		jakość i przydatność rolnicza gleb	agroklimat	rzeźba terenu	warunki wodne	
1.	Dolnośląskie	56,9	10,4	3,8	3,8	74,9
2.	Kujawsko-pomorskie	54,4	9,2	4,0	3,4	71,0
3.	Lubelskie	55,8	10,6	4,0	3,8	74,1
4.	Lubuskie	43,6	11,6	4,3	2,7	62,3
5.	Łódzkie	43,2	11,5	4,4	2,8	61,9
6.	Małopolskie	53,6	9,3	2,4	4,0	69,3
7.	Mazowieckie	43,1	9,7	4,1	3,0	59,9
8.	Opolskie	60,5	13,4	4,1	3,6	81,6
9.	Podkarpackie	52,7	10,7	3,0	4,0	70,4
10.	Podlaskie	41,0	7,5	3,7	2,8	55,0
11.	Pomorskie	50,6	8,5	3,7	3,4	66,2
12.	Śląskie	46,8	11,2	3,6	2,6	64,2
13.	Świętokrzyskie	52,2	10,6	3,1	3,5	69,3
14.	Warmińsko-mazurskie	51,1	8,1	3,4	3,4	66,0
15.	Wielkopolskie	46,4	11,2	4,4	2,8	64,8
16.	Zachodniopomorskie	50,0	9,8	4,0	3,6	67,5
Polska		49,5	9,9	3,9	3,3	66,6

Źródło: Opracowanie własne.

Warunki agroklimatyczne

Rola czynników klimatycznych w kształtowaniu potencjału produkcyjnego siedlisk glebowych nabiera szczególnego znaczenia z uwagi na wzrost częstości deficytu opadów oraz pogorszenia klimatycznego bilansu wodnego w sezonie wegetacyjnym. W kontekście zmian obserwowanych w ostatniej dekadzie istnieje praktyczna potrzeba szerszego upowszechnienia wskaźników charakteryzujących agroklimat zarówno dla potrzeb aktualizacji waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej, jak i szacowania ryzyka spadku plonów podstawowych gatunków roślin uprawnych. Jak już wspomniano wskaźnik agroklimatu był wykorzystywany w analizach uwarunkowań środowiskowych rolnictwa w Polsce w ujęciu dla gmin. Syntetyczny wskaźnik bonitacji agroklimatu opracowano na podstawie częściowych wskaźników bonitacyjnych dla ważniejszych upraw w Polsce, takich jak: pszenica ozima, żyto, jęczmień jary, owies,



Rys. 3. Mapa odczynu gleb Polski

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 3

Zróżnicowanie odczynu gleb użytków rolnych w Polsce

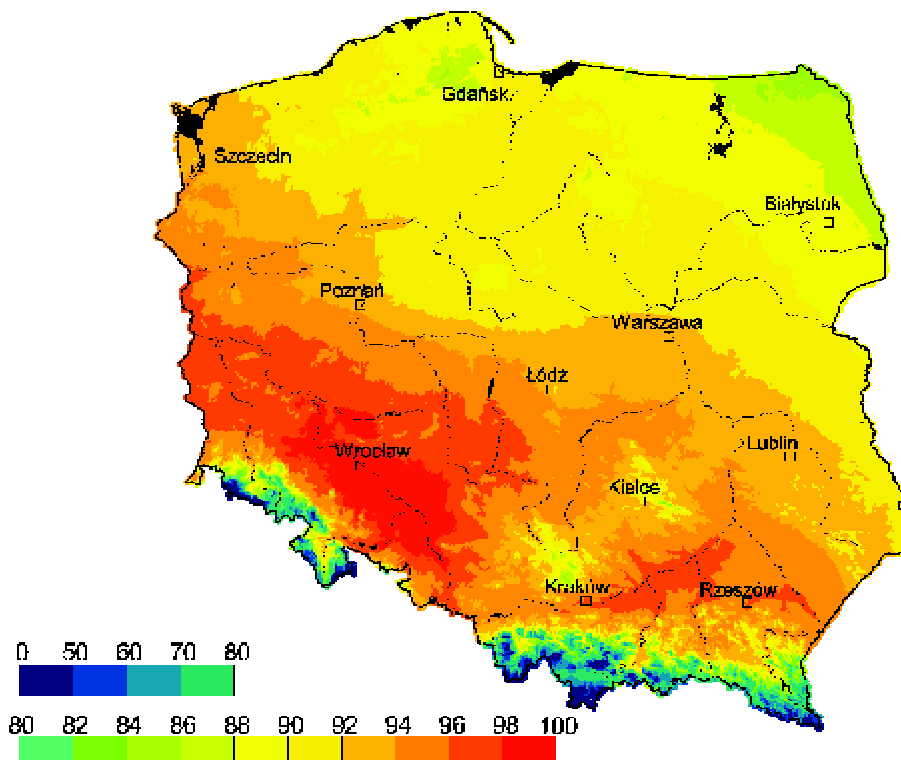
Ocena odczynu	Udział gleb UR w klasach odczynu	
	ha	%
Bardzo kwaśny	4427512	26,2
Kwaśny	5120367	30,3
Lekko kwaśny	4038837	23,9
Obojętny	2754521	16,3
Zasadowy	557664	3,3

Źródło: Opracowanie własne.

kukurydza, ziemniak, burak cukrowy, konieczyna czerwona oraz poplony ścierniskowe. W waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej wskaźnik agroklimatu wyrażono w skali 15-stopniowej. Skala ta miała bezpośrednie odzwierciedlenie w poziomie uzyskiwanych plonów wyrażonych w jednostkach zbożowych. Zmiana uwarunkowań gospodarczych oraz postęp w hodowli roślin sprawiają, że w przyszłości wskaźnik bonitacji nie będzie mógł być bezpośrednio odnoszony do poziomu obecnie uzyskiwanych plonów. Można go natomiast wykorzystywać do wykazania zróżnicowania warunków klimatycznych rolnictwa w Polsce jako miary względnej. Bonitację agroklimatu dla celów porównań względnych można wyrazić w skali 10-punktowej (4). W modelu agroklimatu Polski (MAP); (6), który jest rozwinięciem metod stosowanych w bonitacji agroklimatu do postaci algorytmów numerycznych, dla podkreślenia względności oceny, wskaźnik agroklimatu wyrażony został w skali 100-punktowej (100% w analogii do wcześniejszej skali 10-punktowej). Algorytmy MAP umożliwią tworzenie numerycznych map wskaźnika agroklimatu. Mapa taka powstaje na podstawie Numerycznego Modelu Terenu (NMT) obszaru Polski (14). W bonitacji agroklimatu Polski wyrażonej w skali 100-punktowej różnica wskaźnika pomiędzy obszarami znajdującymi się w południowo-zachodniej Polsce (okolice Opola) a obszarami położonymi na północnym-wschodzie (okolice Suwałk) wynosi ok. 15 punktów i zmienia się od 100 do 85 punktów (rys. 4). Oznacza to, że w okolicach Opola warunki klimatyczne pozwalają uzyskiwać o 15% wyższe plony niż w okolicach Suwałk. Znacznie większe gradienty bonitacji występują wraz ze wzrostem wysokości nad poziom morza (rys. 4). Warunki agroklimatyczne w obszarach górskich, nawet na niewielkiej odległości, wykazują znacznie większą zmienność niż w części nizinnej Polski. Mapy numeryczne wskaźnika bonitacji agroklimatu są podstawą do opracowania wskaźników waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej dla dowolnych jednostek administracyjnych lub regionów funkcjonalnych z wykorzystaniem Geograficznych Systemów Informacji (GIS).

Różnice regionalne syntetycznego wskaźnika agroklimatu w nizinnej części Polski nie są duże, przy czym większe różnice występują we wskaźnikach cząstkowych, szczególnie dla roślin ciepłolubnych. Jednakże analizy przeprowadzone w ostatnich latach uwzględniające wzrost temperatury obserwowany w XX wieku (około 0,9°C na 100 lat) wskazują, że i te gradienty znacznie się zmniejszyły. Mapy numeryczne prawdopodobieństwa dojrzenia kukurydzy na ziarno opracowane dla prognozowanych warunków termicznych na lata 2001–2010 pokazują znaczne zwiększenie zasięgu obszarów przydatnych do uprawy roślin ciepłolubnych. Prawdopodobieństwo dojrzenia kukurydzy FAO 270 w Polsce w prognozie na lata 2001–2010 przekracza na większości obszaru 80% i tylko w górach oraz na północy kraju spada poniżej 20% (rys. 5). Analogicznie można stwierdzić, że wzrastają możliwości uprawy innych roślin ciepłolubnych, takich jak np. proso (15).

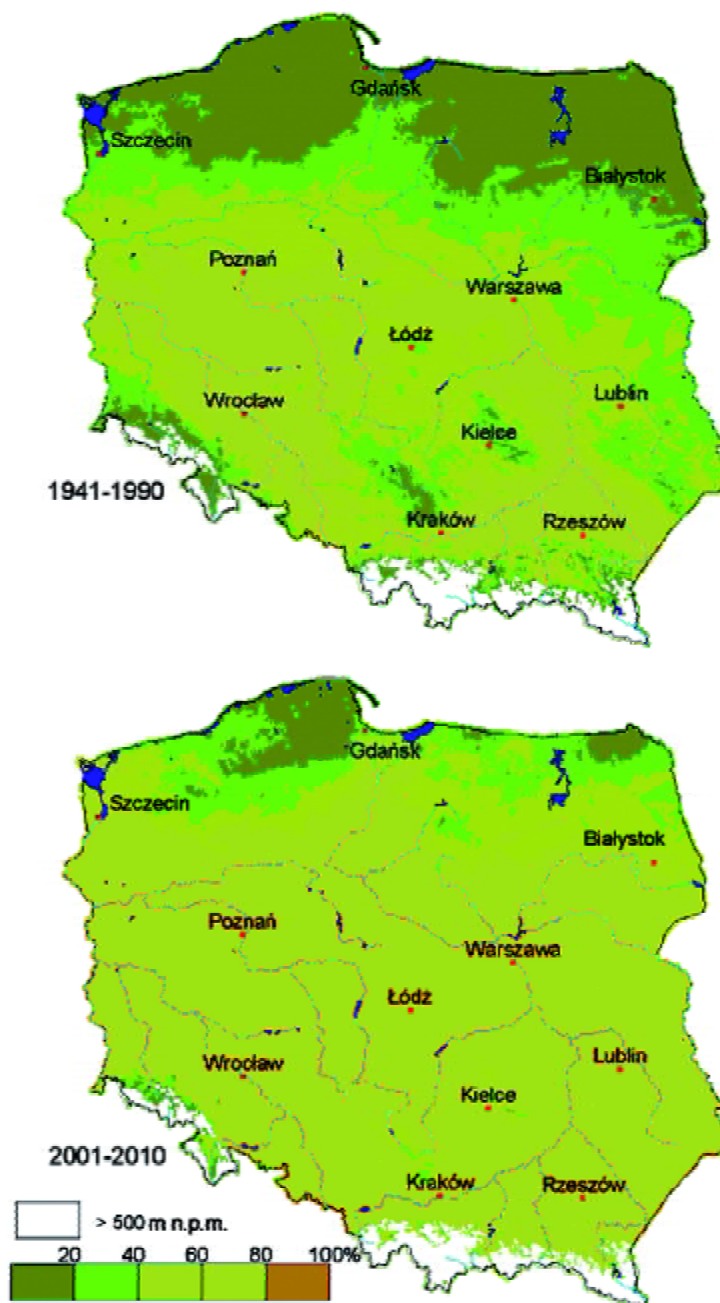
Globalne ocieplenie powoduje nie tylko wzrost zasobów ciepła, co jest w strefie klimatycznej, w której znajduje się obszar Polski jednym z pozytywnych skutków zmian klimatu, ale również większą zmienność przebiegu pogody w kolejnych latach. We



Rys. 4. Wskaźnik bonitacji agroklimatu Polski w skali 100 stopniowej; mapa opracowana z wykorzystaniem algorytmów modeli agroklimatu Polski

Źródło: Opracowanie własne.

wcześniejszych pracach dotyczących oceny agroklimatu Polski podkreślano, że zmienność plonów w latach przewyższa zróżnicowanie regionalne na obszarach położonych poniżej 300 m n.p.m. w Polsce (5). Większa zmienność przebiegu warunków meteorologicznych w ostatnich latach może być przyczyną występowania większych niż dotychczas strat w plonach spowodowanych niekorzystnym przebiegiem pogody. Tezę taką potwierdzają analizy indeksów pogodowych plonów (8), które wyrażają wpływ elementów meteorologicznych na plony roślin uzyskiwane w Polsce. Analiza warunków plonowania pszenicy ozimej w Polsce w ostatnich 40 latach za pomocą indeksów pogodowych wskazuje, że decydującym czynnikiem wpływającym na wielkość uzyskiwanych plonów w Polsce staje się susza występująca w okresie wiosenno-letnim (rys. 6). Szczególnie duże spadki plonów spowodowane suszą wystąpiły w Polsce w latach: 1992, 1994, 2000, 2003 i 2006. W latach 1956–1990 znaczący spadek plonów spowodowany suszą wiosenno-letnią wystąpił tylko w 1964 roku. W 2006 roku, kiedy zanotowano największy w analizowanym wieloleciu spadek plonów, na efekt suszy nałożyła się długotrwała i mroźna zima (rys. 6).

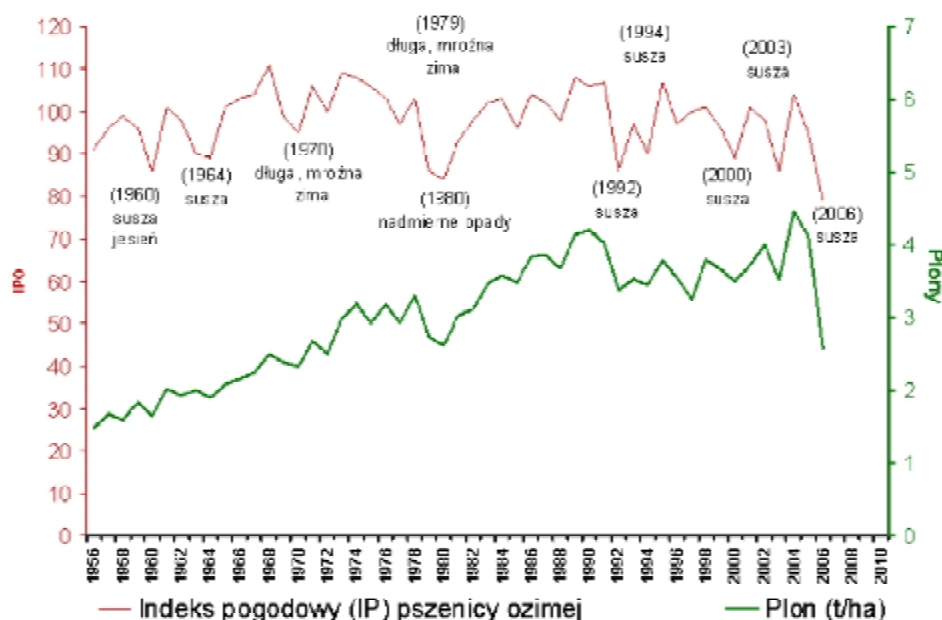


Rys. 5. Prawdopodobieństwo dojrzewania kukurydzy w Polsce w latach 1941–1990 i prognoza na lata 2001–2010

Źródło: Kozyra J., Górski T., 2004 (13).

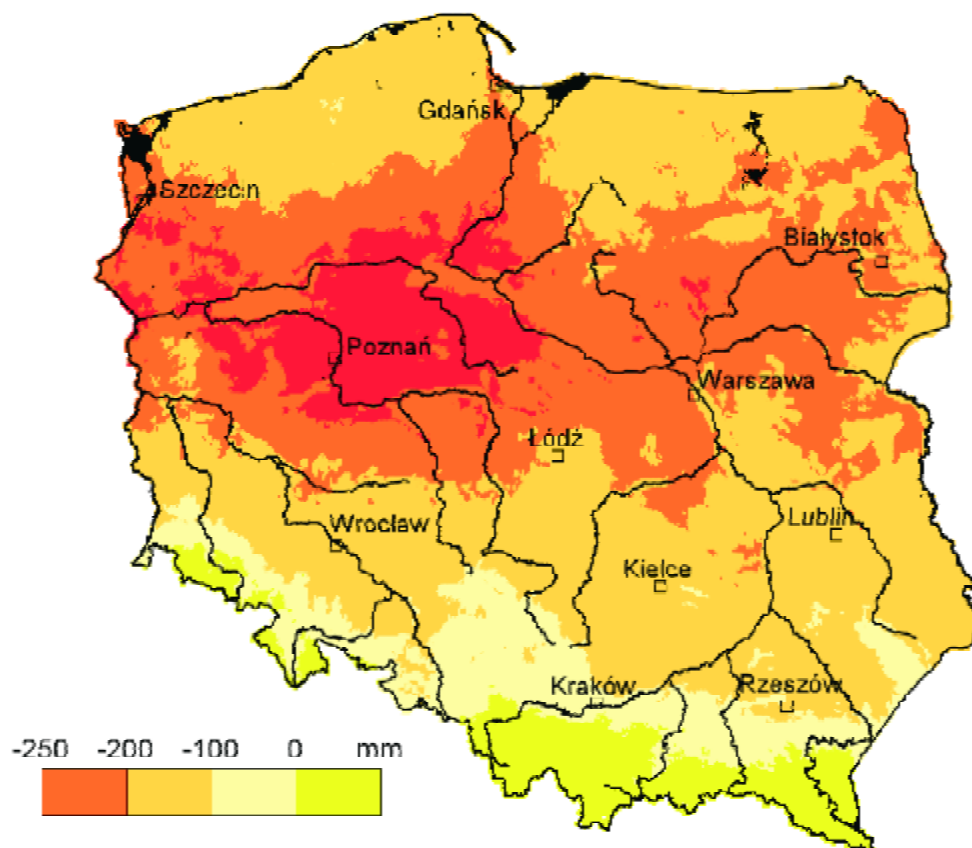
Analiza przebiegu warunków klimatycznych w ostatnim dziesięcioleciu wskazuje, że realizuje się mniej „optymistyczny” dla polskiego rolnictwa scenariusz zmian klimatu, zakładający wzrost temperatury przy braku wzrostu padu atmosferycznego (8). Sytuacja ta będzie miała negatywne skutki dla bilansu wodnego. Na obszarach, gdzie występował dotychczas najniższy bilans wodny w Polsce, przy dalszym wzroście temperatury powietrza w okresie wegetacji i nie zmienionym poziomie opadów atmosferycznych nastąpi dalsze pogorszenie warunków wodnych dla rolnictwa (rys. 7).

Z powodu obserwowanych zmian warunków klimatycznych zachodzi potrzeba weryfikacji „norm” agroklimatycznych i podjęcia prac związanych z adaptacją rolnictwa do obecnych i przyszłych warunków klimatycznych (7). Kierunki koniecznej adaptacji może wskazać prognoza rozkładu wartości temperatury w ciągu roku dla Sandomierza wykonana dla lat 2021–2030, uwzględniająca trend temperatury z XX wieku i porównanie tego przebiegu do wartości średnich temperatury w miejscowości Miskolc, położonej na Węgrzech (rejon uprawy winorośli i tradycyjny rejon uprawy jabłoni) i St. Poelten w dolnej Austrii (rys. 8). Porównanie to wskazuje, że w Polsce za około 20 lat warunki termiczne będą zbliżone do tych, jakie występowały na Węgrzech i w Dolnej Austrii.



Rys. 6. Indeksy pogodowe i trend plonów pszenicy ozimej w Polsce w okresie 1956–2006 (w nawiasach zaznaczono lata i przyczynę spadku plonów)

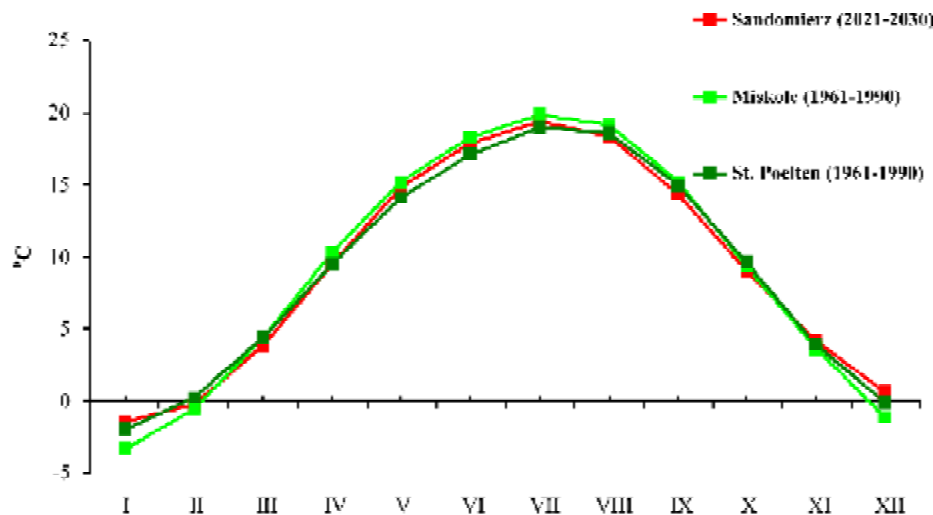
Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 7. Klimatyczny bilans wodny w Polsce w okresie od kwietnia do września
Źródło: Opracowanie własne.

Wykorzystanie metod modelowania do waloryzacji przestrzeni rolniczej

Przestrzenne zróżnicowanie wskaźnika waloryzacji przestrzeni produkcyjnej odzwierciedla stan warunków klimatycznych właściwych dla wielolecia, według norm obliczonych dla lat 90. Obserwowane w ostatnich latach trendy klimatyczne i perspektywa dalszych zmian prowadzących do pogorszenia stosunków wodnych gleb powoduje konieczność przyjęcia bardziej dynamicznego podejścia do waloryzacji warunków siedliskowych, z wykorzystaniem metod modelowania. Zaletą modelowania jest możliwość bieżącej weryfikacji wyceny jakości siedliska w sposób odzwierciedlający na przykład wpływ zmian rozkładu opadów i temperatur na bilans wodny gleb i plonowanie roślin. Ma to istotne znaczenie ze względu na zwiększenie zasięgów obszarów dotkniętych suszą glebową. W warunkach wzrastającego deficytu wody szczególnie wrażliwe na skutki stresu wodnego będą rośliny uprawiane na glebach o ograniczonych zdolnościach retencyjnych, należących do kompleksów żyniego słabego i bardzo słabego, a w części również do kompleksu żyniego dobrego.



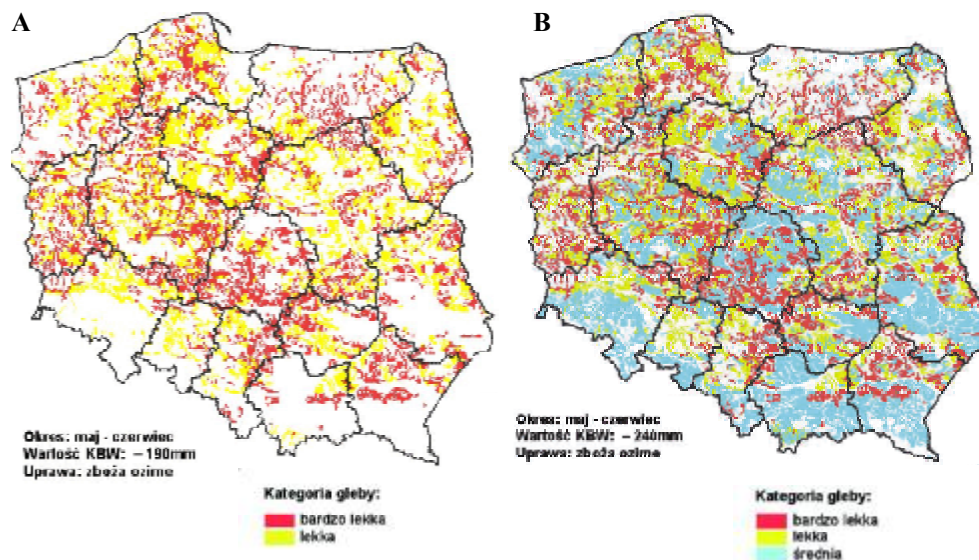
Rys. 8. Prognoza średnich wartości temperatury powietrza dla Sandomierza na lata 2021–2030 i średnie wartości temperatury powietrza w Miskolcu (Węgry) i St. Poelten (Austria) w latach 1961–1990

Źródło: Opracowanie własne, a dane dla Miskolca i St. Poelten pochodzą z bazy WMO – CLINO (2).

Na rysunku 9 przedstawiono teoretyczne przestrzenne zasięgi gleb, które będą dotknięte suszą w stopniu powodującym spadek plonu o 15%, w przypadku wystąpienia dwóch różnych poziomów klimatycznego bilansu wodnego (KBW), liczonego dla okresu sześciu dekad maja i czerwca (-190 mm i -240 mm).

Zobrazowane różnice potencjalnych zasięgów suszy wynikają z różnic w pojemności wodnej gleb, zdeterminowane przez uziarnienie poszczególnych poziomów profilu glebowego. Model opisujący relacje pomiędzy przydatnością przestrzeni (PP), dostępnością wody dla roślin w profilu, produkcją suchej masy, temperaturą i nachyleniem terenu został wykorzystany w celu określenia wartości KBW, przy których na poszczególnych kategoriach agronomicznych gleb należy się liczyć z wystąpieniem objawów suszy glebowej. Na podstawie modelu ustalono szczegółowe kryteria wyznaczania obszarów dotkniętych suszą zawarte w rozporządzeniu Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 maja 2007 r. w sprawie wartości klimatycznego bilansu wodnego dla poszczególnych gatunków roślin uprawnych i gleb (18). Ze względu na praktyczne wykorzystanie modelu w opracowaniu kryteriów stosowanych w legislacji oraz jego przydatność do waloryzacji warunków siedliskowych (w funkcji dynamicznie zmieniających się norm poszczególnych elementów klimatu) poniżej przedstawiono szczegółowy opis założeń teoretycznych, wykorzystanych w modelu algorytmów. Wyniki modelowania porównano na mapach z dotychczasowym podejściem do waloryzacji.

Największym problemem w modelowaniu przydatności rolniczej przestrzeni (PP) dla poszczególnych gatunków roślin jest właściwa ocena wpływu na jakość siedliska



Rys. 9. Porównanie teoretycznych zasięgów przestrzennych kategorii agronomicznych gleb dotkniętych suszą pod uprawą zbóż ozimych – wartości KBW dla sześciu dekad w okresie maj-czerwiec A: -190 mm, B: -240 mm

Źródło: Opracowanie własne.

takich czynników, jak: właściwości gleby, ukształtowanie terenu, temperatura i opady. Należy zaznaczyć, że przydatność przestrzeni jako wskaźnika determinowanego przez wiele różnych czynników jest wielkością bezpośrednio niemierzalną i do jej wyznaczenia konieczne jest znalezienie powiązań z ilościowymi charakterystykami produkcji rolniczej.

Dotychczas w większości opracowań dotyczących tego zagadnienia do oszacowania wpływu poszczególnych czynników składających się na PP wykorzystywano intuicyjny związek pomiędzy PP a plonami roślin (21). Zależność tę można sformalizować jako iloczyn plonu maksymalnego ($Y_{\max}$) dla danej rośliny oraz dwóch czynników bezwymiarowych o zakresie wartości od 0 do 1, a mianowicie PP i funkcji będącej miarą kultury rolnej i poziomu technologicznego na danym terenie.

W warunkach Polski dobrym odzwierciedleniem poziomu technologicznego rolnictwa jest średnia powierzchnia działki rolnej (pd) w danej gminie. Obszary z dominacją bardzo małych działek najczęściej charakteryzują się niskim poziomem organizacji i wykorzystania potencjału siedliska. Wraz ze wzrostem powierzchni działek ograniczenia organizacyjne ulegają zmniejszeniu, co prowadzi do lepszego wykorzystania siedliska.

Zależność tę można opisać następującą funkcją:

$$Y_a = Y_{\max} \cdot PP \cdot \left(1 - e^{-\frac{pd}{100}}\right)^{\varphi} \quad (1)$$

gdzie parametr φ określa wielkość wpływu powierzchni działki na zmiany plonu roślin.

W modelu przydatność przestrzeni (PP) opisano jako iloczyn czynników glebowo-przyrodniczych i organizacyjnych przyjmujących wartości z zakresu od 0 do 1:

$$PP = \left(\frac{DM}{DM_{\max}}\right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{FC - PWP}{300}\right)^{\beta} \cdot \left(\frac{pH}{8}\right)^{\gamma} \cdot \left(\frac{T}{30}\right)^{\delta} \cdot \left(1 - \frac{h}{2000}\right)^{\varepsilon} \quad (2)$$

Pierwszy czynnik w równaniu 2 wyraża stosunek plonu suchej masy (DM) do plonu suchej masy uzyskiwanego w optymalnych warunkach wilgotnościowych ($DM_{\max}$); jego wartość jest miarą stresu wodnego w sezonie wegetacyjnym. Produkcja suchej masy poszczególnych gatunków roślin w modelu jest ograniczona przez ilość wody dostępnej dla roślin, zależną od właściwości retencyjnych pokrywy glebowej, opadów i ewapotranspiracji. Dlatego ilość wody dostępnej dla roślin jest obliczana na podstawie modelu bilansu wodnego uwzględniającego retencyjne charakterystyki gleb, takie jak: połowa pojemność wodna (FC) oraz punkt trwałego wędnięcia (PWP), średnie opady i ewapotranspirację potencjalną w kolejnych miesiącach sezonu wegetacyjnego z wykorzystaniem modelu agroklimatu Polski (6). Obliczenia wykonywane są iteracyjnie w kroku czasowym jednego miesiąca. Miąższość profilu glebowego, dla której wykonywane są obliczenia bilansu wynosi 1 m. Punktem wyjścia w obliczeniach jest proste równanie bilansu wodnego, pozwalające wyliczyć wilgotność gleby w danym miesiącu na podstawie znajomości stanu wilgotności z poprzedniego miesiąca:

$$MOIST_i(n) = MOIST_{i-1}(n-1) + \left(\frac{PRE(n) - ET(n)}{1000}\right) \quad (3)$$

gdzie:

$MOIST(n)$ – wilgotność objętościowa gleby w miesiącu n

$PRE(n)$ – opad (mm)

$ET(n)$ – ewapotranspiracja rzeczywista (mm)

i – kolejny krok czasowy (liczba iteracji)

Jeśli obliczona według wzoru (3) wilgotność $MOIST(n)$ jest większa od połowej pojemności wodnej (FC) to nadmiar wody jest odejmowany, zakładając jej odpływ w głąb profilu glebowego. Odpływ nie występuje w miesiącach zimowych, czyli

w okresach, gdy temperatura jest niższa od zera. Kolejne fazy rozwojowe rośliny, z uwzględnieniem ich wpływu na poziom ewapotranspiracji rzeczywistej, modelowane są za pomocą metody opracowanej przez FAO (1).

Drugi czynnik we wzorze (2) określa zasoby wody dostępnej dla roślin w profilu glebowym do głębokości 1 m i stanowi ogólną miarę jakości gleby, odzwierciedlając zdolności retencyjne profilu glebowego. Trzeci i czwarty czynnik to odpowiednio odczyn gleb (pH) i średnia roczna temperatura powietrza (T). Wzrost obydwu tych parametrów znajduje odzwierciedlenie we wzroście plonów roślin. Piąty czynnik w równaniu odzwierciedla wpływ wysokości nad poziomem morza (h) na plon. Wzrost wysokości jest zazwyczaj silnie powiązany z pogorszeniem warunków rzeźby terenu, wyrażających się dużym nachyleniem stoków, intensyfikacją procesów erozyjnych, kamienistością gleb, co w konsekwencji ogranicza możliwości pełnego zastosowania współczesnych technologii uprawy, powodując znikome wykorzystanie potencjału produkcyjnego siedliska.

Podstawiając równanie 2 do równania 1 uzyskuje się plon rzeczywisty Y_a , jako funkcję różnych czynników ograniczających plon maksymalny, możliwy do uzyskania w warunkach braku wziętych pod uwagę czynników niekorzystnych:

$$Y_a = Y_{\max} \cdot \left(\frac{DM}{DM_{\max}} \right)^{\alpha} \cdot \left(\frac{FC - PWP}{300} \right)^{\beta} \cdot \left(\frac{pH}{8} \right)^{\gamma} \cdot \left(\frac{T}{30} \right)^{\delta} \cdot \left(1 - \frac{h}{2000} \right)^{\varepsilon} \cdot \left(1 - e^{-\frac{pd}{100}} \right)^{\varphi} \quad (4)$$

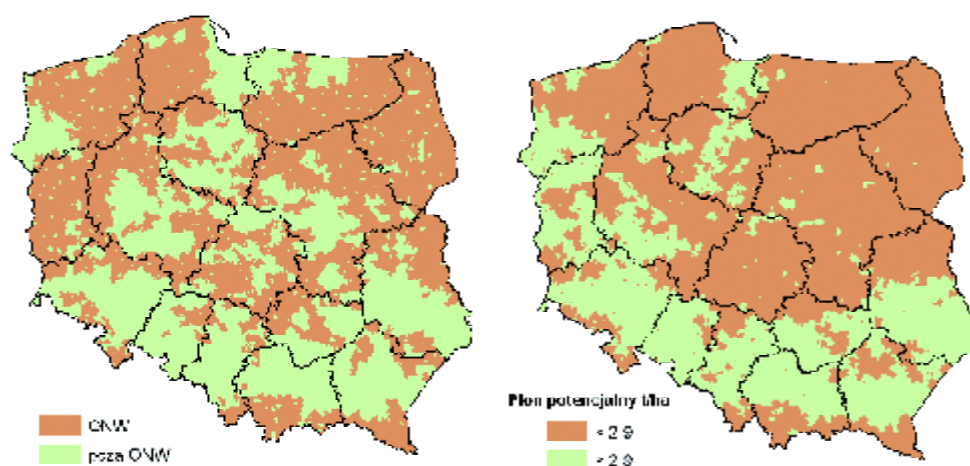
Wykorzystanie powyższej funkcji do wyznaczenia PP polega na znalezieniu współczynników: $Y_{\max}$, α , β , γ , δ , ε i φ , tak aby plony rzeczywiste były jak najbliższe przewidywanym na podstawie równania; miarą dopasowania jest suma kwadratów różnic pomiędzy plonem przewidywanym a plonem mierzonym. Równanie ma postać stosowanej w ekonometrii funkcji produkcji Cobba-Douglasa, co sprawia, że po obustronnym zlogarytmowaniu otrzymuje się funkcję liniową, której współczynniki mogą być łatwo wyznaczone metodą regresji liniowej wielokrotnej (33). Znalezione w ten sposób współczynniki pozwalają na obliczenie PP na podstawie wzoru (2). Współczynniki równania dopasowano na bazie danych z GUS, charakteryzujących średnie plony 4 zbóż w gminach. Współczynnik dopasowania (R^2) pomiędzy wartościami plonu przewidywanymi przez model a wartościami rzeczywistymi wynosi 0,46. Jest to wartość dość wysoka, zważywszy na fakt, że do obliczeń użyto danych glebowych pozyskanych z cyfrowej mapy glebowo-rolniczej w skali 1 : 100000. Warto zwrócić uwagę, że podobna zależność pomiędzy plonem a wskaźnikiem przydatności rolniczej przestrzeni produkcyjnej WPRPP dla gmin, opracowanym z wykorzystaniem map glebowo-rolniczych w skali 1 : 5000, daje współczynnik dopasowania wynoszący 0,53.

Oprócz mapy glebowo-rolniczej, jako danych wejściowych do modelu użyto cyfrowych warstw charakteryzujących: temperaturę, opady i ewapotranspirację w ujęciu dla poszczególnych miesięcy roku, odczyn gleb, a także numeryczny model terenu. Mapę odczynu opracowano poprzez interpolację danych punktowych, uzyskanych w ramach badań chemizmu gleb Polski, w wyniku analizy około 49 tys. próbek glebo-

wych. Dane o plonach i powierzchniach działek pozyskano z GUS. Wszystkie warstwy wykorzystywane w obliczeniach z użyciem modelu bilansu wodnego przekształcono do formatu rastrowego o rozdzielczości 1 km.

Wyniki modelowania plonu potencjalnego porównano z dotychczasowym podejściem do waloryzacji przestrzeni za pomocą wskaźnika waloryzacji rolniczej przestrzeni produkcyjnej (WWRPP). Na rysunku 10 przedstawiono zasięgi obszarów o niekorzystnych warunkach (ONW) wydzielone na podstawie WWRPP oraz kryteriów demograficznych (23) na tle zasięgów obszarów o niskich plonach potencjalnych; próg plonu $< 2,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ przyjęto tak, aby uzyskać najlepsze dopasowanie zasięgów ONW do zasięgów występowania niskich plonów potencjalnych. Porównanie przedstawionych map wskazuje na względnie wysoką zgodność wyników waloryzacji przydatności przestrzeni (PP) opracowanej na podstawie modelu oraz zasięgów występowania obszarów o niekorzystnych warunkach wydzielonych w oparciu o wskaźnik waloryzacji (WWRPP).

W tabeli 4 przedstawiono udziały powierzchni o niekorzystnych warunkach w poszczególnych województwach oraz odsetek powierzchni, dla których wyniki modelowania są zgodne z dotychczasowym podejściem do wydzielenia ONW. Należy podkreślić dużą na ogół zgodność pomiędzy wydzieleniami ONW na podstawie waloryzacji oraz wskaźników demograficznych (gęstości zaludnienia) z waloryzacją przestrzeni (PP) opracowaną na podstawie modelu. Obserwowane rozbieżności wynikają w dużej mierze ze zróżnicowania czynnika demograficznego na obszarach ONW, który nie jest uwzględniony w modelu. Prezentowany model może znaleźć zastosowanie w praktyce, biorąc pod uwagę perspektywę zmiany podejścia Komisji Europej-



Rys. 10. Zasięgi przestrzenne obszarów zaliczonych do ONW i obszarów o niskim plonie potencjalnym ($< 2,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$)

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 4

Analiza zgodności powierzchni obszarów ONW i obszarów o niskim plonie potencjalnym

Województwo	Udział obszarów ONW w pow. UR (%)	Udział obszarów o plonie potencjalnym $< 2,9 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$ (%)	Powierzchnia zgodna (%)
Dolnośląskie	35,8	28,6	81,0
Kujawsko-pomorskie	46,0	67,4	67,2
Lubelskie	41,8	41,3	79,7
Lubuskie	86,8	29,2	35,7
Łódzkie	58,3	95,4	61,4
Małopolskie	32,4	34,2	85,8
Mazowieckie	64,3	96,0	67,2
Opolskie	15,8	18,4	79,0
Podkarpackie	38,0	38,7	79,0
Podlaskie	93,3	99,7	93,7
Pomorskie	64,7	82,2	80,8
Śląskie	24,2	33,9	67,8
Świętokrzyskie	44,7	38,6	70,3
Warmińsko-mazurskie	74,2	97,1	77,7
Wielkopolskie	57,1	70,1	69,1
Zachodniopomorskie	67,3	68,4	80,5
Polska	55,4	64,2	73,9

Źródło: Opracowanie własne.

skiej do wydzieleni ONW i ujednolicenia stosowanej metodologii ilościowej oceny ograniczeń siedliskowych dla produkcji rolniczej. W przypadku wykorzystania metod modelowania obszary ONW w Polsce nie ulegną zmniejszeniu, jakkolwiek pewnej korekcie może podlegać ich rozkład przestrzenny. Ustalenie przyszłego kształtu ONW będzie przedmiotem odpowiednich konsultacji z instytucjami unijnymi oraz decyzji w sferze wspólnej polityki rolnej.

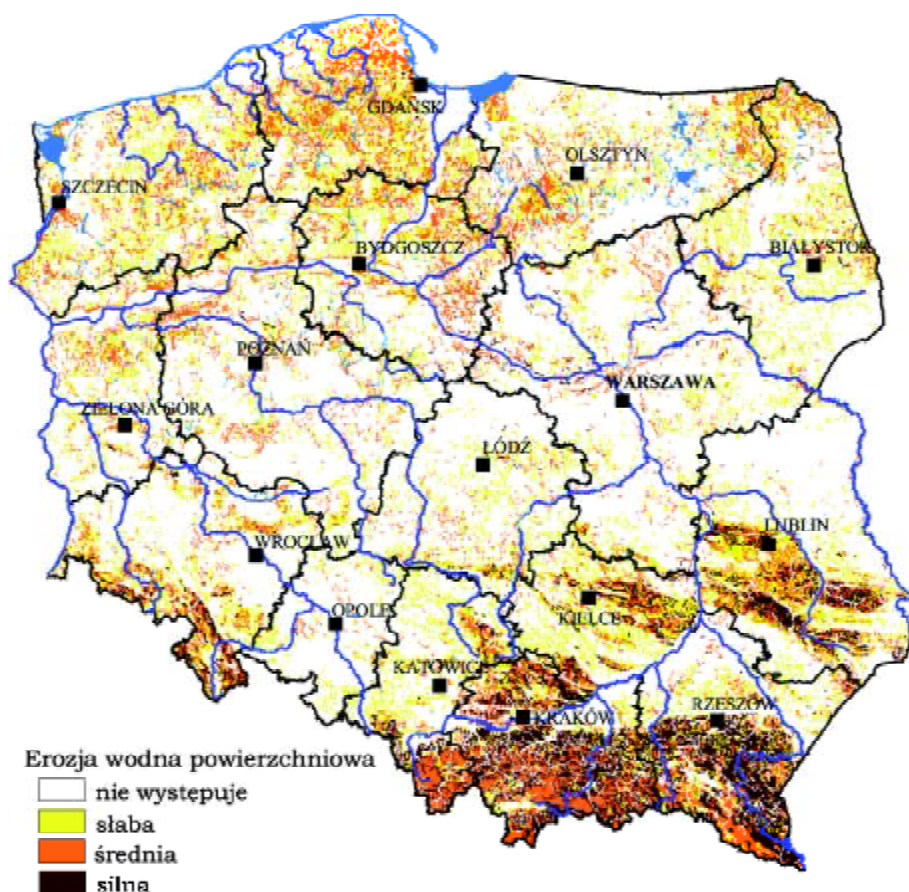
W dalszych pracach nad modelem należy skoncentrować się na ocenie poziomu niepewności analizy bilansu wodnego gleb i rozkładu wody dostępnej dla roślin w sezonie wegetacyjnym. Walidacja modelu będzie realizowana w ramach inicjowanego obecnie monitoringu suszy glebowej. W systemie monitoringu zostaną wykorzystane pomiary wilgotności gleb w kilkudziesięciu punktach reprezentatywnych dla pokrywy glebowej Polski, jak również cyfrowa mapa glebowo-rolnicza w skali 1 : 25 000.

Wyniki modelowania wskazują, że do zasadniczych czynników ograniczających plonowanie roślin uprawnych w Polsce należą ograniczone zdolności retencyjne gleb wytworzonych z piasków, zakwaszenie gleb oraz czynniki strukturalne związane z rozdrobnieniem gospodarstw i ograniczonym dostępem do technologii. Wymienione czynniki pozostają w interakcji z czynnikami klimatycznymi, spośród których na ryzyko spadku plonu największy wpływ mają deficyty wody w sezonie wegetacyjnym; ich skutki są szczególnie dotkliwe na glebach lekkich o ograniczonej pojemności wodnej.

Erozja wodna

Istotne zagrożenie dla jakości gleb Polski związane jest również ze zjawiskami erozji wodnej. Stan zagrożenia gleb rozją wodną powierzchnią opracowano z uwzględnieniem roli głównych czynników sprawczych, takich jak: nachylenie terenu, podatność gleb na zmywy powierzchniowe i wielkość opadu rocznego (10, 11). Przeprowadzone badania wykazały, że około 29% obszaru kraju, w tym 21% użytków rolnych, głównie gruntów ornych i około 8% powierzchni lasów jest zagrożonych erozją wodną, w tym silną – 4%, średnią – 11%, a słabą – 14% (rys. 11, tab. 5).

Największy udział gleb zagrożonych erozją wodną powierzchnią wykazano w woj. małopolskim – około 57% ogólnego obszaru, przy czym dominuje erozja silna (26% obszaru), a erozja średnia występuje na 21% obszaru. Również w woj. podkarpackim przeważa zagrożenie erozją silną – 17% ogólnego obszaru, podczas gdy erozja średnia występuje na około 11%, a słaba na 8% obszaru województwa. W obu



Rys. 11. Mapa zagrożenia gleb erozją wodną powierzchnią w Polsce

Źródło: Wawer R., Nowocien E., 2007 (31).

Tabela 5

Erozja wodna powierzchniowa w Polsce i w poszczególnych województwach

Województwo	Pow. ogólna (km ²)	Zagrożenie erozją w stopniu																Stopień pilności przeciwneroznej
		1 - słabym				2 - średnim				3 - silnym				stopień 2 + 3				
		UR		Ls		UR		Ls		UR		Ls		UR		Ls		
		km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	km ²	%	
Dolnośląskie	19947,8	1924,4	9,6	990,0	5,0	1361,5	6,8	754,2	3,8	289,7	1,5	346,1	1,7	1651,2	8,3	1100,3	5,5	2
Kujawsko- pomorskie	17969,7	2116,2	11,8	520,3	2,9	1773,6	9,9	671,2	3,7	57,0	0,3	3,6	0,0	1830,6	10,2	674,8	3,8	2
Lubelskie	25114,5	3386,7	13,5	456,4	1,8	1927,3	7,7	280,7	1,1	1307,3	5,2	219,6	0,9	3234,6	12,9	500,3	2,0	2
Lubuskie	13984,4	807,2	5,8	842,9	6,0	587,3	4,2	847,8	6,1	12,9	0,1	14,9	0,1	600,2	4,3	862,7	4,9	3
Łódzkie	18219,1	2139,9	11,7	442,1	2,4	771,0	4,2	287,2	1,6	78,9	0,4	16,8	0,1	849,9	4,7	304,0	1,7	3
Małopolskie	15144,1	1198,5	7,9	256,5	1,7	1712,5	11,3	1440,5	9,5	3116,0	20,6	848,2	5,6	4828,5	31,9	2288,7	15,1	1
Mazowieckie	35597,8	2641,1	7,4	539,4	1,5	1232,8	3,5	745,6	2,1	147,2	0,4	50,6	0,1	1380,0	3,9	796,2	2,2	3
Opolskie	9412,5	676,3	7,2	156,9	1,7	200,8	2,1	116,9	1,2	8,1	0,1	1,2	0,0	208,9	2,2	118,1	1,3	3
Podkarpackie	17926,3	1168,2	6,5	349,6	2,0	1084,0	6,0	832,4	4,6	2015,6	11,2	1052,3	5,9	3099,6	17,3	1884,7	10,5	1
Podlaskie	20179,6	2836,1	14,0	692,5	3,4	1488,9	7,4	479,2	2,4	51,2	0,2	13,2	0,1	1540,1	7,6	492,4	2,4	3
Pomorskie	18292,9	2235,9	12,2	1023,4	5,6	2409,0	13,2	1789,0	9,8	29,2	0,2	20,9	0,1	2439,2	13,2	1809,9	9,9	2
Śląskie	12294,4	1914,8	1,6	560,2	4,6	831,6	6,8	840,8	6,8	658,9	5,4	199,1	1,6	1490,5	12,1	1039,9	8,5	2
Świętokrzyskie	11672,3	2269,9	19,4	500,3	4,3	982,9	8,4	192,7	1,7	829,8	7,1	92,0	0,8	1812,7	15,5	284,7	2,4	2
Warmińsko- mazurskie	24203,0	2863,8	11,8	756,8	3,1	2566,9	10,6	872,0	3,6	10,0	0,0	9,5	0,0	2576,9	10,6	881,5	3,6	2
Wielkopolskie	29825,6	1977,1	6,6	650,4	2,2	1416,9	4,8	885,0	3,0	45,1	0,2	49,3	0,2	1462,0	4,9	934,3	3,1	3
Zachodniopomorskie	22901,5	2724,5	11,9	1401,1	6,1	1717,8	7,5	1355,0	5,9	4,0	0,0	2,3	0,0	1721,8	7,5	1357,3	5,9	2
Polska	312685,0	32980,6	10,5	10138,8	3,2	22064,8	7,1	12390,2	4,0	8660,9	2,8	2939,6	0,9	30725,7	9,8	15329,8	4,9	2

Źródło: Wawer R., Nowocien E., 2007 (31).

województwach występuje pierwszy stopień pilności przeciwdziałania erozji – ochrona bardzo pilna.

Poważny problem, chociaż występujący bardziej lokalnie, erozja wodna stwarza również w województwach: śląskim, świętokrzyskim, lubelskim i dolnośląskim, gdzie erozja silna łącznie ze średnią zagraża takiej samej lub nawet większej powierzchni województwa niż erozja słaba. Województwa te są objęte drugim stopniem pilności ochrony przeciwerozyjnej – ochrona pilna.

Drugi stopień pilności ochrony występuje także w woj. pomorskim i zachodniopomorskim. W województwach tych erozja średnia przeważa lub zajmuje takie same powierzchnie, jak erozja słaba, od 23 do 13% ogólnego obszaru. W sześciu pozostałych województwach (lubuskim, łódzkim, mazowieckim, opolskim, podlaskim i wielkopolskim) o terenach równinnych erozja średnia występuje na kilku procentach ogólnej powierzchni, a silna ma rozmiar poniżej 1%. Są to regiony, w których potrzeby ochrony gleb przed erozją są najmniejsze.

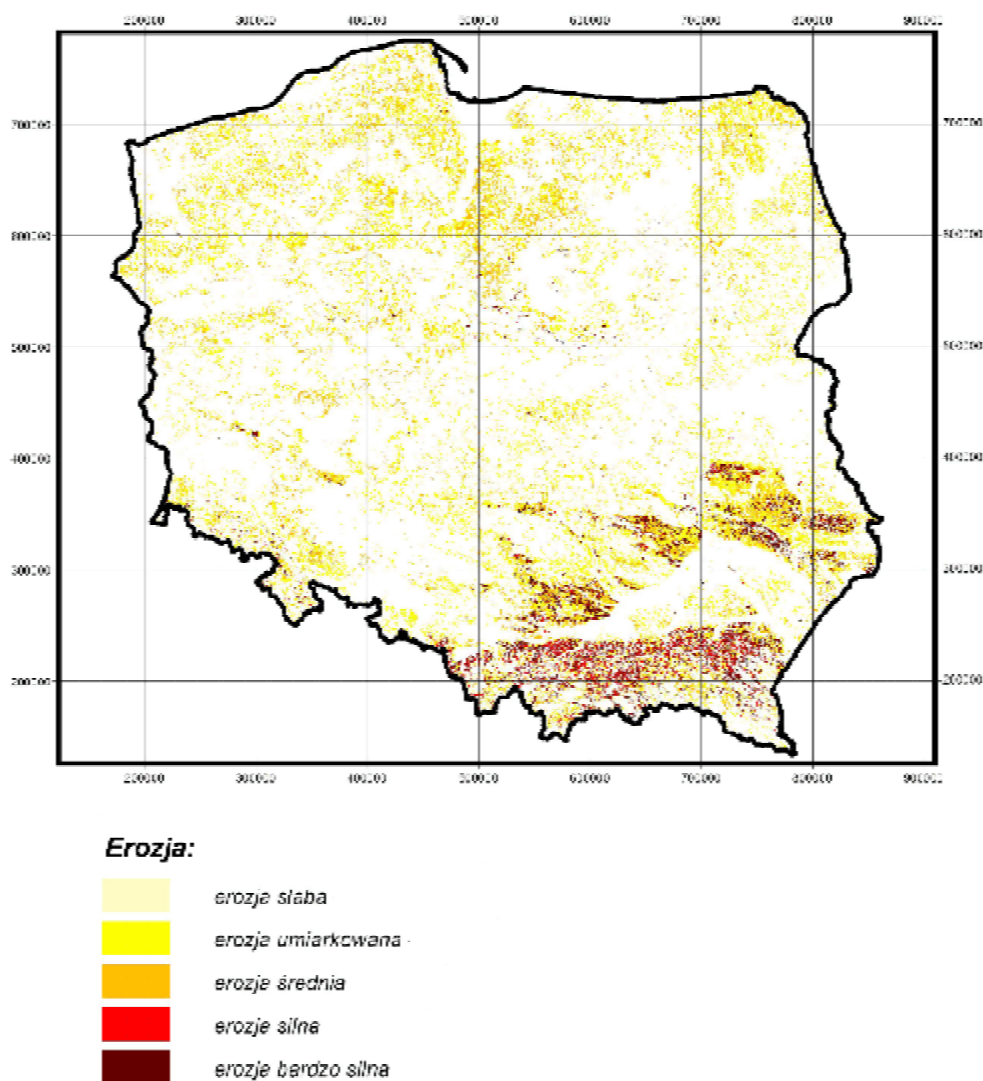
Rozpatrując rzeczywisty poziom zagrożenia erozją z uwzględnieniem aktualnego pokrycia terenu stwierdza się znaczne ograniczenie zasięgów i intensywności erozji wodnej powierzchniowej, wynikające ze względnie korzystnej struktury użytkowania gruntów (rys. 12, tab. 6). Struktura użytkowania terenu w Polsce, według danych CORINE 2000, sprzyja zmniejszeniu zagrożenia erozją wodną powierzchniową. Znajduje to odzwierciedlenie w zmniejszeniu udziału najwyższych stopni zagrożenia erozją wodną powierzchniową (3-5) z potencjalnego 16,5% do aktualnego 7,1%. Aby zmniejszyć wciąż dość wysokie aktualne zagrożenie erozją wodną powierzchniową należałoby zastosować na obszarze jej występowania melioracje przeciwerozyjne, w tym transformację użytków rolnych w użytki ochronne. Dotyczy to ponad 2,2 mln ha, w tym około 500 tys. ha zagrożonych erozją wodną bardzo silną, w trybie bardzo pilnym. W ochronie gleb przed erozją istotną rolę odgrywają pakiety rolnośrodowiskowo-

Tabela 6

Aktualne zagrożenie gleb erozją wodną powierzchniową według CORINE 2000 (2000 r.)

Stopień nasilenia erozji	Objaśnienie	Erozja wodna potencjalna		Erozja wodna aktualna	
		powierzchnia			
		tys. ha	%	tys. ha	%
0	brak erozji	20967,8	67,0	25506,4	81,6
1	erozja słaba	4775,0	15,3	578,8	1,9
2	erozja umiarkowana			2939,8	9,4
3	erozja średnia	3693,9	11,8	1380,5	4,4
4	erozja silna	1479,4	4,7	318,9	1,0
5	erozja bardzo silna			528,4	1,7
3-5	erozja średnia-silna	5173,3	16,5	2227,8	7,1
Suma (0-5)		31253,0	100	31252,8	100

Źródło: Wawer R., Nowocień E., 2006 (32).



Rys. 12. Aktualne zagrożenie gleb erozją wodną powierzchniową obszaru Polski (2000 r.)
Źródło: Wawer R., Nowocień E., 2006 (32).

we wdrażane w ramach Planu Rozwoju Obszarów Wiejskich (PROW) – ocena skuteczności tych instrumentów wymaga przeprowadzenia odpowiednich badań i analiz z wykorzystaniem pomiarów bezpośrednich oraz metod modelowania.

Zakładając dalsze wyłączenie gruntów z użytkowania ornego na rzecz zalesień, zadrzewień oraz innych użytków rolnych (sady czy trwałe użytki zielone) o funkcji glebochronnej należy się spodziewać dalszego zmniejszenia zasięgu i intensywności występowania zarówno erozji wodnej powierzchniowej, jak i erozji wietrznej.

Występujące w ostatnim czasie susze glebowe oraz globalny trend wzrostu średnich temperatur miesięcznych w okresie ostatnich 6 lat mogą doprowadzić do przesuszenia gleb poniżej ich średniej naturalnej wilgotności, co w konsekwencji może istotnie zwiększyć zasięg występowania i intensywność erozji wodnej na gruntach ornych.

Prognozowane w symulacjach najbardziej prawdopodobnych scenariuszy zmiany klimatu, zakładające zwiększenie intensywności opadów atmosferycznych, szczególnie w okresie wiosenno-jesiennym, istotnie wpłyną na zwiększenie intensywności erozji wodnej powierzchniowej.

Glebowa materia organiczna – stan i zagrożenia

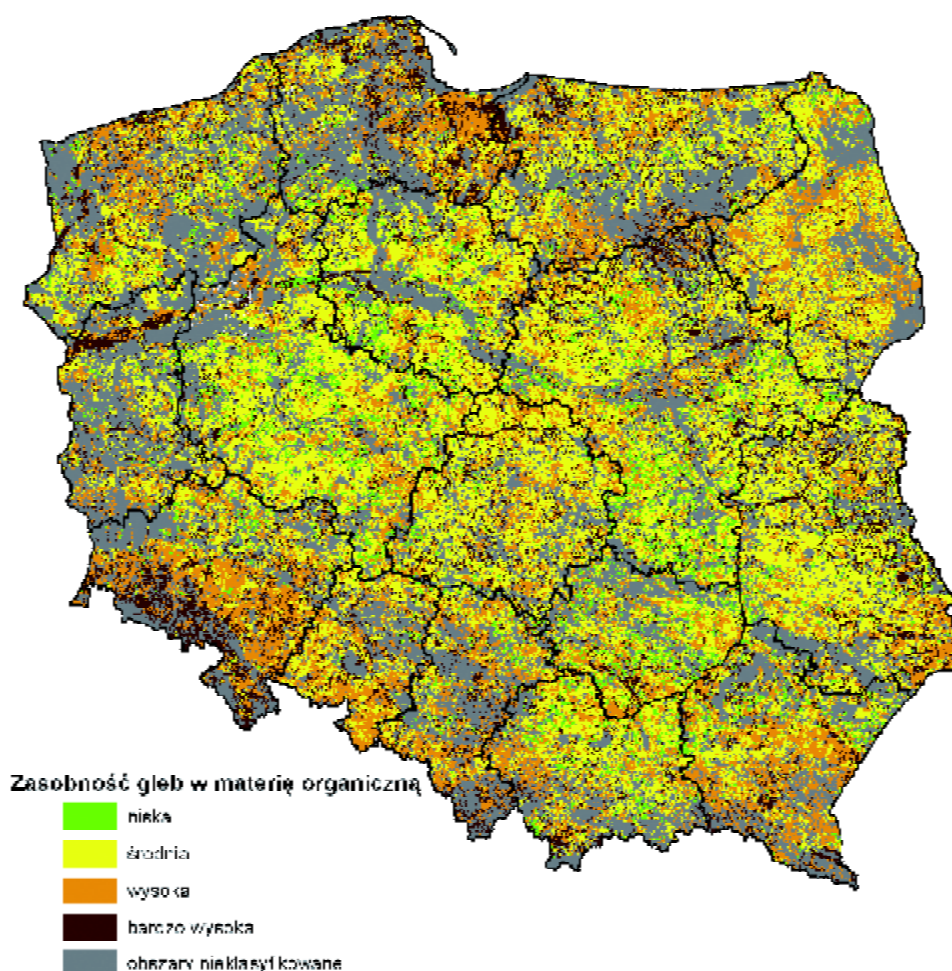
Ilość materii organicznej w glebach jest podstawowym wskaźnikiem oceny ich jakości, decydującym o ich właściwościach fizykochemicznych gleb, takich jak zdolności sorpcyjne i buforowe oraz o procesach przemian biologicznych, ważnych z punktu widzenia funkcjonowania siedliska, a określanych mianem aktywności biologicznej. Wysoka zawartość próchnicy w glebach jest czynnikiem stabilizującym ich strukturę, zmniejszającym podatność na zagęszczenie oraz degradację w wyniku erozji wodnej i wietrznej (3, 30).

Zachowanie zasobów próchnicy glebowej jest istotne nie tylko ze względu na utrzymanie produkcyjnych funkcji gleb, ale również z punktu widzenia roli gleb w sekwestracji (wiązaniu) dwutlenku węgla z atmosfery, przyczyniającej się do zmniejszenia efektu cieplarnianego. Intensywne użytkowanie gleb w monokulturach niszczy strukturę gleb, prowadzi do nadmiernej aeracji siedlisk oraz mineralizacji próchnicy i uwalniania dużych ilości dwutlenku węgla do atmosfery. Emisja CO₂ z gleb stanowi istotną pozycję w całkowitym bilansie emisji z różnych sektorów gospodarki.

O naturalnym zróżnicowaniu zawartości próchnicy w glebach decydują takie czynniki, jak: uziarnienie, położenie w terenie i stosunki wodne. Gleby lekkie występujące na obszarach wyżej położonych, poza zasięgiem działania wód gruntowych, zazwyczaj cechuje niższa zawartość próchnicy niż gleb cięższych o opadowo-gruntowym typie gospodarki wodnej. Najwyższą zawartością materii organicznej charakteryzują się gleby hydrogeniczne, powstałe w siedliskach zależnych od wody, takie jak czarne ziemie i gleby torfowe. Spośród czynników antropogenicznych na zawartość materii organicznej w glebie w największym stopniu wpływają: sposób użytkowania ziemi (tzn. rolniczy, łukowy, leśny), intensyfikacja rolnictwa, dobór roślin uprawnych oraz poziom nawożenia naturalnego i organicznego.

Ubytek próchnicy jest ważnym wskaźnikiem pogorszenia warunków siedliskowych oraz żyzności gleb. Nieracjonalne rolnicze wykorzystanie gleb może prowadzić do obniżenia w nich zawartości materii organicznej, na przykład w wyniku przesuszenia, związanego z melioracjami odwadniającymi i przyspieszonej mineralizacji wywołanej zbyt intensywną uprawą. Intensywne użytkowanie gleb w połączeniu z uproszczeniem płodozmianów oraz dominacją roślin zbożowych może prowadzić do ograniczenia ilości resztek organicznych wchodzących w cykl przemian próchnicy, a w konse-

kwencji do spadku jej zawartości w glebach. W ostatnich latach w niektórych regionach kraju obserwuje się wzrost powierzchni użytków rolnych wykorzystywanych wyłącznie dla celów produkcji roślinnej w gospodarstwach bezinwentarzowych, a więc pozbawionych nawożenia naturalnego i organicznego jako istotnego elementu kształtowania zasobów próchnicy glebowej. Wyniki oznaczeń zasobności gleb użytków rolnych w Polsce (w warstwie 0-25 cm) wskazują na duże zróżnicowanie zawartości próchnicy (0,5-10%). Średnia zawartość wynosi 2,2%. Według podziału stosowanego w Polsce gleby o niskiej zawartości próchnicy (<1,0%) stanowią około 6% powierzchni użytków rolnych, a o średniej (1,1-2,0%) – około 50%. Gleby zasobne w próchnicę (>2,0%) stanowią około 33% powierzchni użytków rolnych kraju (tab. 7, rys. 13).



Rys. 13. Zawartość substancji organicznej w glebach użytków rolnych w Polsce
Źródło: Terelak H. i in., 2001 (28).

Tabela 7

Zawartość materii organicznej w glebach użytków rolnych

Województwo	Średnia zawartość materii organicznej (%)	Udział próbek o zawartości materii organicznej (%)			
		<1,0	1,0-2,0	2,0-3,5	>3,5
		niskiej	średniej	wysokiej	b. wysokiej
Dolnośląskie	3,04	2,8	24,2	44,3	28,6
Kujawsko-pomorskie	1,85	10,3	62,1	21,5	6,1
Lubelskie	2,02	5,4	60,5	27,2	6,9
Lubuskie	2,11	4,5	56,0	30,7	8,8
Łódzkie	2,12	3,5	57,8	30,7	8,0
Małopolskie	2,25	10,0	41,6	35,7	12,7
Mazowieckie	1,94	10,7	56,8	25,6	6,9
Opolskie	2,33	1,1	43,7	44,5	10,7
Podkarpackie	2,39	6,7	34,5	46,6	12,3
Podlaskie	2,06	2,7	63,0	25,0	9,2
Pomorskie	2,65	3,0	32,8	46,1	18,1
Śląskie	2,59	3,4	35,2	44,4	16,9
Świętokrzyskie	1,83	16,9	49,2	28,2	5,7
Warmińsko-mazurskie	2,22	2,7	53,5	34,4	9,4
Wielkopolskie	1,99	7,4	56,9	28,8	6,9
Zachodniopomorskie	2,29	3,5	44,1	42,7	9,7
Polska	2,20	6,2	49,8	33,4	10,6

Źródło: Opracowanie własne.

Według kryteriów przyjętych w konwencjach międzynarodowych zawartość próchnicy poniżej 3,5% (ok. 2% C_{org}) traktowana jest jako przejaw pustynnienia. W takim ujęciu 89% areалу polskich gleb użytkowanych rolniczo należałoby zaliczyć do gleb o niskiej zawartości materii organicznej i uznać je za zagrożone suszą. Oczywiście jest to konsekwencja specyfiki gleb Polski, z dużym udziałem gleb wytworzonych z piasków i gleb lekkich, o niskiej pojemności wodnej, w naturalny sposób determinujących warunki akumulacji próchnicy. W naszych warunkach bardziej zasadnym od progu 3,5% zawartości próchnicy punktem odniesienia w ocenie degradacji jej zasobów byłaby analiza trendów.

W ostatnich latach przeprowadzono wstępną analizę trendu zmian zawartości próchnicy w glebach na podstawie powtórnych badań profili wzorcowych. Badania wykazały istnienie silnego trendu spadku zawartości próchnicy, głównie w glebach wyjściowo zasobnych w materię organiczną. Spadek zawartości materii organicznej jest związany ze zmianą stosunków wodnych gleb, bardziej intensywnym użytkowaniem i odwodnieniem melioracyjnym. Dla kontrastu, w dużej części gleb lekkich na przestrzeni ostatnich 30 lat zachodzi wzrost zawartości próchnicy związany ze wzrostem poziomu nawożenia oraz przyrostem ilości resztek pożywnych.

Mapę ryzyka strat próchnicy z gleb opracowano na podstawie pomiarów zawartości próchnicy w glebach województwa dolnośląskiego i podlaskiego przeprowadzonych w latach 1968–1983 i w roku 2003. Zmiany zawartości materii organicznej

w glebach związane są z dwoma przeciwstawnymi procesami: mineralizacją i depozycją. Proces mineralizacji prowadzi do obniżenia zawartości materii organicznej w glebie. Tempo tego spadku najsilniej zależy od początkowej zawartości materii organicznej, drugorzędne znaczenie mają stosunki wodne i temperatura (19). Proces depozycji powoduje wzrost zawartości próchnicy dzięki stałemu dopływowi materii organicznej ze źródeł takich, jak: resztki poźniwne czy też nawożenie naturalne i organiczne. Ilość wykonanych pomiarów pozwoliła jedynie na znalezienie zależności pomiędzy tempem zmian materii organicznej a jej początkową zawartością w glebie. Poprzez tempo zmian zawartości materii organicznej rozumie się stosunek różnicy pomiędzy końcową zawartością próchnicy i jej zawartością początkową (wyrażonych w %) a okresem czasu, w którym nastąpiła zmiana, wyrażonym w latach. Innymi słowy jest to procentowy roczny ubytek zawartości próchnicy. Znaleziona zależność ($n = 371$) ma następującą postać:

$$\frac{OM_f - OM_i}{\Delta t} = a \cdot OM_i + b \quad R_2 = 0,39$$

gdzie:

$a = -0,0221$

$b = 0,0406$

Δt – czas pomiędzy pomiarami

OM – z indeksami i i f oznaczają odpowiednio wartości próchnicy pomierzone w latach 1968–1983 i 2003 r.

Z postaci tej zależności wynika, że lewa strona równania staje się równa zero, tzn. zawartość próchnicy jest stabilna, przy zawartości próchnicy równej $-b/a = 1,84\%$. Gleby o zawartości próchnicy wyższej od tego poziomu będą tracić, a gleby o zawartości niższej zyskiwać materię organiczną.

Ponieważ w latach siedemdziesiątych wzrosła średnia głębokość orki, co było związane z intensywną mechanizacją rolnictwa, zawartość próchnicy uległa rozcieńczeniu w wyniku przemieszania poziomu próchnicznego z podglebiem. Zmiana głębokości orki dotyczy przedziału pomiędzy 25 a 30 cm. Założono ponadto, że zawartość próchnicy w „dooranej” warstwie wynosi połowę procentowej zawartości próchnicy w warstwie górnej. Przekształcenie opisujące proces rozcieńczenia wyrażone jest wzorem:

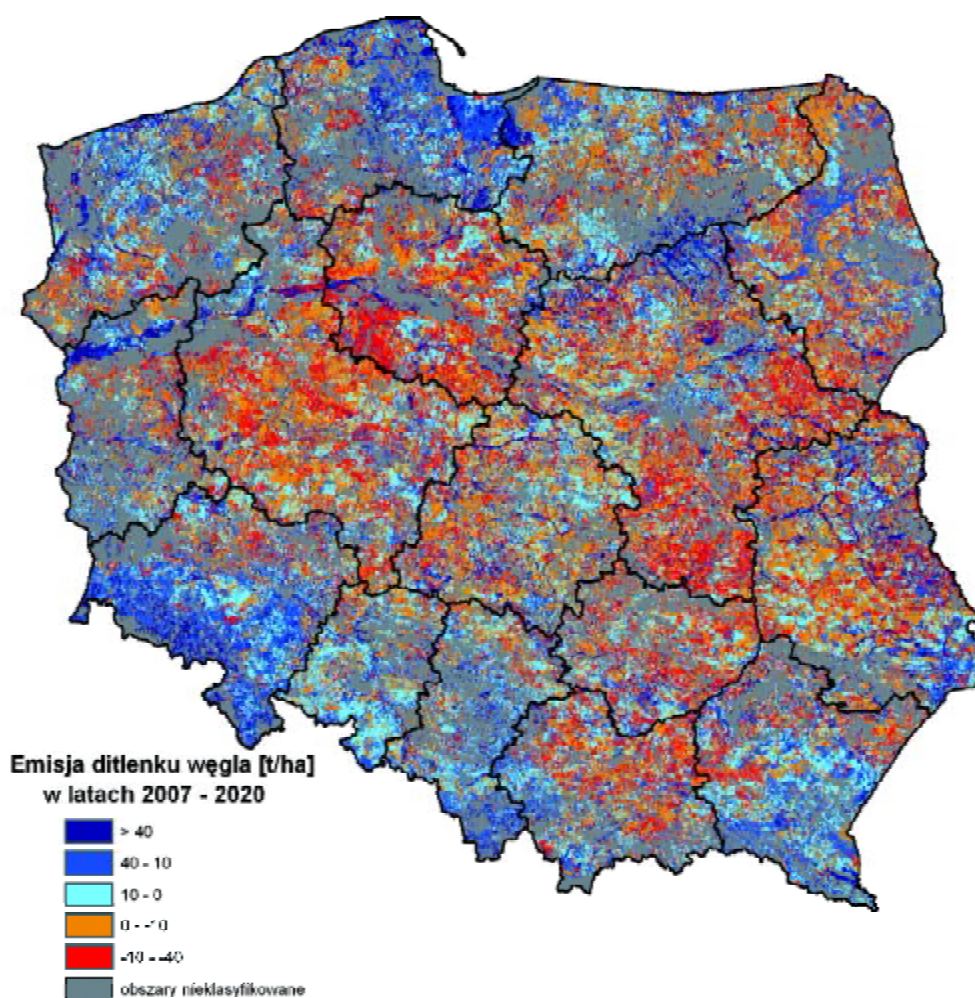
$$OM_i = \frac{25 \cdot OM_i^m + 5 \cdot 0,5 \cdot OM_i^m \cdot \max\left(0; \min\left(1; \frac{1982 - rok}{1982 - 1972}\right)\right)}{30}$$

gdzie: OM z górnym indeksem m jest zmierzona zawartością próchnicy

W oparciu o równanie na zmianę zawartości próchnicy i interpolowane (22) na mapie w skali 1 : 100000 zawartości próchnicy pochodzące z monitoringu prowadzonego dla mineralnych gleb Polski w roku 1995 obliczono spodziewane jej zawartości

w glebach użytków rolnych kraju w latach 2007 i 2020. Procentowa zmiana zawartości próchnicy w tym przedziale czasu została przeliczona na ilość w tonach na hektar użytków rolnych, a następnie na tony dwutlenku węgla, co zobrazowano na rysunku 14 i podsumowano w tabeli 8, z podziałem na województwa.

Obszary ujemnej emisji dwutlenku węgla przedstawione na mapie (rys. 14) wskazują na występowanie gleb zdolnych do wiązania węgla z atmosfery. Dane w tabeli 8 można traktować jako oszacowanie ryzyka utraty funkcji gleb w wyniku mineralizacji próchnicy. Bilans ilości emisji i wiązania węgla w glebach jest wysoce ujemny w poszczególnych województwach. W wymiarze finansowym straty te można oszacować stosując stawki z handlu emisjami dwutlenkiem węgla. Wyznaczone obszary



Rys. 14. Mapa przestrzennego rozmieszczenia gleb użytków rolnych emitujących (straty) i akumulujących węgiel

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 8

Prognoza strat materii organicznej z gleb użytków rolnych w perspektywie 2020 r. (emisja CO₂)

Województwo	Straty (t · ha ⁻¹)	Akumulacja (t · ha ⁻¹)	Bilans (t · ha ⁻¹)	Straty (1000 t)	Akumulacja (1000 t)	Bilans (1000 t)
Dolnośląskie	24,69	9,75	-16,30	19700	2505	-17195
Kujawsko-pomorskie	39,16	10,44	-7,61	15631	7286	-8344
Lubelskie	35,07	8,21	-11,74	25557	6993	-18564
Lubuskie	38,75	8,76	-19,07	11323	1810	-9514
Łódzkie	26,89	7,69	-8,10	14091	4797	-9293
Małopolskie	17,67	10,45	-3,23	6740	4208	-2533
Mazowieckie	32,92	10,73	-7,46	29624	13511	-16114
Opolskie	18,35	6,05	-10,26	6868	1123	-5745
Podkarpackie	18,48	10,38	-8,27	9769	3004	-6765
Podlaskie	18,66	8,48	-4,52	10334	5110	-5225
Pomorskie	37,31	9,40	-23,58	22739	2385	-20354
Śląskie	21,18	8,90	-12,18	7750	1391	-6359
Świętokrzyskie	20,22	12,45	-2,19	5774	4380	-1393
Warmińsko-mazurskie	33,20	7,42	-14,28	20922	4078	-16844
Wielkopolskie	22,37	11,54	-1,28	15240	12935	-2304
Zachodniopomorskie	33,74	9,17	-15,43	20079	4062	-16017
Polska	28,00	9,38	-10,59	242141	79578	-162563

Źródło: Opracowanie własne.

ryzyka ubytku glebowej materii organicznej powinny być uwzględnione w działaniach na rzecz ochrony gleb zarówno w ramach istniejących instrumentów programów rolnośrodowiskowych, jak również w nowych przedsięwzięciach związanych z upowszechnianiem uproszczonych systemów uprawy sprzyjających sekwestracji węgla glebowego.

Zagęszczenie gleb – stan i zagrożenia

Wzrost mechanizacji prac polowych podczas siewu i zbioru płodów rolnych prowadzi często, zwłaszcza w krajach wysoko rozwiniętych, do nadmiernego zagęszczenia gleb zarówno w warstwie ornej, jak i w podglebiu. Poruszające się po polu ciężkie maszyny i ciągniki powodują nadmierne zagęszczenie warstw głębiej leżących nawet do głębokości >0,9 m. Z kolei stosowane przez wiele lat zabiegi uprawowe spulchniają tylko warstwę orną. W praktyce rolniczej tradycyjny system uprawy roli (płużny) powoduje spulchnienie wierzchniej warstwy gleby, ale również przyczynia się do powstania zagęszczenia podglebia i powstawania tzw. podeszwy płużnej. Do zagęszczenia gleby dochodzi wówczas, gdy cząsteczki glebowe zostają ściśnięte pod wpływem przyłożonej siły, wskutek której następuje redukcja wielkości porów między cząstkami gleby. Powoduje to wzrost masy fazy stałej gleby w stosunku do zajmowanej przez nią objętości (wzrost gęstości objętościowej gleby). Nadmierne zagęszczenie utrudnia penetrację gleby przez korzenie roślin uprawnych, które w tych niekorzystnych wa-

runkach mają ograniczony dostęp do wody i składników pokarmowych. Ponadto zmniejsza się wielkość porów, wzrasta udział powierzchni porów wypełnionych wodą przy wilgotności polowej oraz następuje obniżenie temperatury gleby. Wpływa to na aktywność organizmów glebowych poprzez zmniejszenie wskaźnika rozkładu substancji organicznej i uwalnianie składników pokarmowych dla roślin. Zagęszczenie gleby wpływa na zmniejszenie jej infiltracji, w wyniku czego następuje wzrost spływu powierzchniowego oraz tworzenie bezodpływowych zastoisk.

Zagęszczone gleby można łatwo zidentyfikować, gdyż charakteryzują się słabą i zbitą strukturą tworzącą duże bryły, wykazują wysokie wartości oporu penetracji, posiadają większą gęstość objętościową, ograniczone ukorzenianie się roślin oraz deformację korzeni, które są spłaszczone, poskręcane i zgrubiałe.

Podatność gleb na zagęszczenie jest uzależniona od zawartości wody w glebie w chwili wykonywania zabiegów. Gleby o mniejszej zawartości wody są bardziej odporne na zagęszczenie niż gleby wilgotne lub mokre. Na zagęszczenie gleby dodatkowo istotny wpływ mają: tekstura gleby, przyłożona siła dogęszczająca (masa maszyn i nacisk na jednostkę powierzchni), właściwości gleby (zawartość materii organicznej oraz zawartość części spławianych), liczba przejazdów ciągników i maszyn. Szczególnie podatne na zniszczenie struktury i utratę funkcji retencyjnych są gleby o dużej zawartości części spławialnych, zwięzłe gliny i ły. Ogólnie podatność na zagęszczenie wzrasta wraz ze wzrostem udziału frakcji koloidalnej i spadkiem zawartości próchnicy w glebie; szczególnie niekorzystne jest wykonanie zabiegów uprawowych ciężkim sprzętem w warunkach nadmiernego uwilgotnienia.

Gleby w Polsce wykazują duże zróżnicowanie podatności na ugniatanie, co wynika ze zmienności składu granulometrycznego oraz zawartości materii organicznej. Podatność gleb na zagęszczenie jest zagadnieniem złożonym, gdyż poszczególne gleby wykazują zróżnicowany stopień podatności na zagęszczanie w zależności od zawartości substancji organicznej. Łączna powierzchnia gleb wysoce narażonych na zagęszczenie w wyniku niewłaściwych technik uprawy, sprzętem o zbyt dużych naciskach, w warunkach nadmiernego uwilgotnienia wynosi 2600317 ha, co stanowi około 15% użytków rolnych. Do gleb szczególnie podatnych na skutki ugniatania należą gliny ciężkie, ły oraz gliny lekkie. Przestrzenne rozmieszczenie tych gleb tworzy dużą mozaikę, co jest cechą charakterystyczną dla pokrywy glebowej w Polsce. Szczególnie niekorzystne warunki uprawy występują w dolinach rzecznych, na nadmiernie uwilgotnionych zwięzłych madach, w okresie wykonania prac uprawowych. Skutki zagęszczenia na tych glebach są długotrwałe i trudno odwracalne.

Podatność ornej warstwy gleby na zagęszczenie oszacowana została przy użyciu modelu regresyjnego Alcor (9, 16). Zmiennymi niezależnymi w modelu są gęstość objętościowa gleby, pojemność powietrzna (różnica wilgotności objętościowych odpowiadających pełnemu nasyceniu i polowej pojemności wodnej), woda dostępna dla roślin (różnica polowej pojemności wodnej i punktu trwałego wędnięcia), woda niedostępna dla roślin (wilgotność w punkcie trwałego wędnięcia), przewodność hydrauliczna w stanie pełnego nasycenia gleby wodą, procentowa zawartość próchnicy, kohezja i kąt tarcia wewnętrznego. Zmienną zależną jest wartość krytyczna nacisku

(ang. pre-compression stress) przy wilgotności gleby odpowiadającej połowej pojemności wodnej wyrażony w kPa.

Przyjęto następującą klasyfikację podatności gleby na zagęszczenie (tab. 9).

Tabela 9

Klasy podatności gleby na zagęszczenie

Podatność na zagęszczenie	Wartość krytyczna nacisku (kPa)
Niska	>150
Średnia	90-150
Wysoka	<90

Źródło: Opracowanie własne.

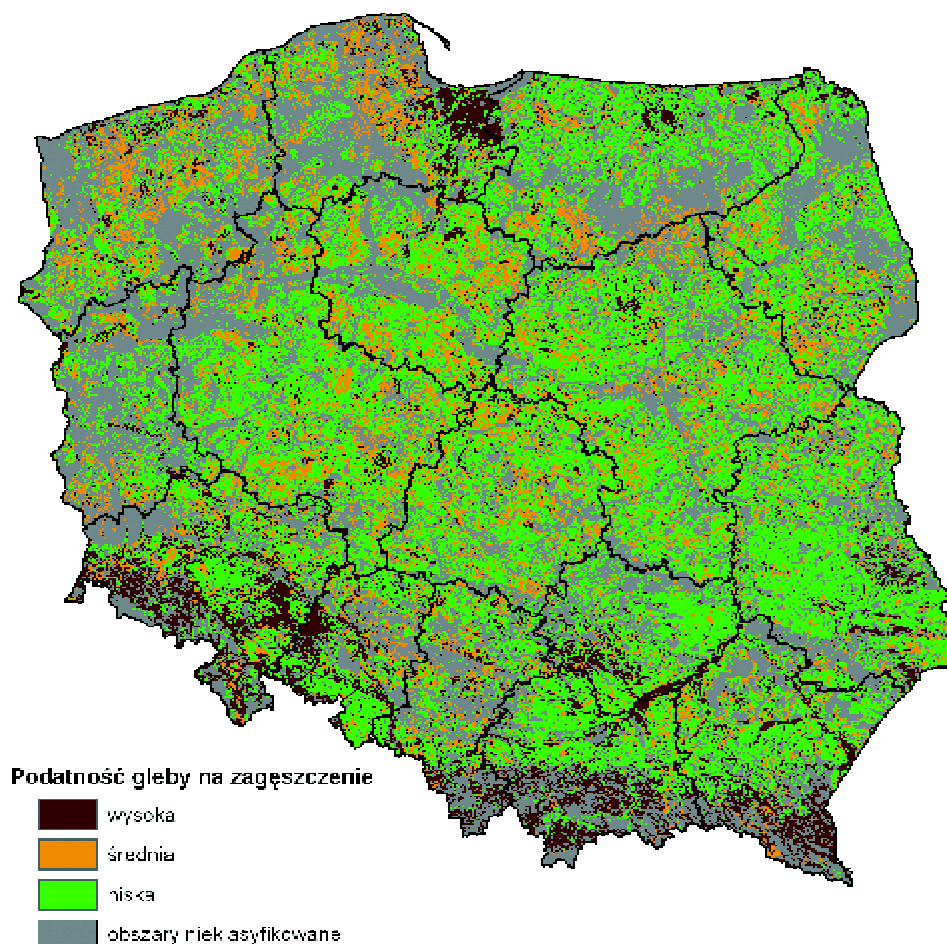
Dużym udziałem gleb podatnych na zagęszczenie charakteryzuje się pokrywa glebowa województwa dolnośląskiego (41,2%), małopolskiego (40,5%), opolskiego (34%) i podkarpackiego (33,6%); (tab. 10, rys. 15). Ponad 20% udziałem gleb o wysokiej podatności na zagęszczenie charakteryzują się użytki rolne w województwie śląskim i pomorskim. Ze względu na upowszechnienie intensywnych technologii uprawy zagęszczenie gleb jest istotnym czynnikiem pogarszającym warunki siedliskowe w województwach opolskim, dolnośląskim i pomorskim.

Tabela 10

Powierzchnia gleb użytków rolnych w różnych klasach podatności na zagęszczenie

Województwo	Średnia podatność (kPa)	Podatność na zagęszczenie					
		niska		średnia		wysoka	
		ha	%	ha	%	ha	%
Dolnośląskie	131,2	465135	44,1	155045	14,7	434547	41,2
Kujawsko-pomorskie	177,5	702195	64,0	340125	31,0	53762	4,9
Lubelskie	176,5	1177818	74,5	213430	13,5	189716	12,0
Lubuskie	154,9	312754	62,7	125700	25,2	60356	12,1
Łódzkie	158,9	788466	68,7	291514	25,4	67714	5,9
Małopolskie	155,3	407656	52,0	58797	7,5	317501	40,5
Mazowieckie	170,0	1567613	72,6	472875	21,9	118759	5,5
Opolskie	150,0	282699	50,5	87329	15,6	190332	34,0
Podkarpackie	148,3	441698	54,0	101427	12,4	274834	33,6
Podlaskie	174,0	791026	68,4	276397	23,9	89048	7,7
Pomorskie	141,9	360874	41,8	293534	34,0	208927	24,2
Śląskie	151,7	272616	52,2	111240	21,3	138397	26,5
Świętokrzyskie	172,9	443583	69,6	66283	10,4	127466	20,0
Warmińsko-mazurskie	206,1	815183	69,1	247740	21,0	117971	10,0
Wielkopolskie	158,5	1243341	69,0	464901	25,8	93701	5,2
Zachodniopomorskie	158,1	522069	50,3	397520	38,3	117284	11,3
Polska	164,0	10594727	62,7	3703857	21,9	2600317	15,4

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 15. Mapa podatności gleb na zanieczyszczenie

Źródło: Opracowanie własne.

Występowanie metali śladowych w glebach i konsekwencje dla jakości plonów

Informacje o stanie zanieczyszczenia gleb użytkowanych rolniczo w Polsce metalami ciężkimi opierają się na wynikach badań chemizmu gleb Polski przeprowadzonych w latach 1992–1997 (29). Program obejmował analizę ponad 49 tys. próbek pobranych z terenów użytków rolnych całego kraju.

Udział procentowy gleb w 5-stopniowej skali zanieczyszczenia według kryteriów IUNG (12) przedstawiono w tabeli 11. Ponad 99% gleb w Polsce wykazuje zawartość miedzi, niklu i ołowiu na poziomie tła naturalnego (0 stopień) lub zawartość lekko podwyższoną (I stopień); gleby te zgodnie z przyjętymi kryteriami traktowane są jako

Tabela 11

Zawartość wybranych metali ciężkich w glebach Polski użytkowanych rolniczo w warstwie powierzchniowej (0-20 cm). Wyniki monitoringu gleb w latach 1992–1997 (n = 45 278)

Metal	Zawartość		Udział gleb w poszczególnych klasach zanieczyszczeń (%)							
	średnia	zakres								
	mg · kg ⁻¹		0	I	II	III	IV	V	nie zanieczyszczone (0-I)	zanieczyszczone (II-V)
Cd	0,2	0,01-50	88,2	10,0	1,2	0,3	0,2	0,1	98,2	1,8
Cu	7	0,2-293	97,5	2,2	0,2	0	0,1	0	99,7	0,3
Ni	6	0,1-328	94,7	4,9	0,4	0	0	0	99,6	0,4
Pb	14	0,1-1723	97,2	2,3	0,3	0,2	0	0	99,5	0,5
Zn	33	0,5-2838	88,0	10,6	1,2	0,2	0	0	99,6	0,4

Źródło: Terelak H. i in. 1999 a, Terelak H. i in. 1997 (24, 29).

nie zanieczyszczone. W odniesieniu do kadmu i cynku udział ten wynosi ponad 98%. Nieco inaczej kształtuje się sytuacja dla gleb województwa śląskiego, w którym 21,5% gleb użytkowanych rolniczo kwalifikuje się jako w różnym stopniu zanieczyszczone kadmem (II-V stopień), przy czym 4% stanowią gleby silnie lub bardzo silnie zanieczyszczone (27).

Zastosowanie aktualnie obowiązujących kryteriów, zawartych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi (17), do oceny stanu zanieczyszczenia gleb Polski wykazało, że ponad 99% wszystkich gleb użytkowanych rolniczo w Polsce latach 1992–1997 można zaliczyć do nie zanieczyszczonych metalami śladowymi (tab. 12).

Przestrzenną ocenę zawartości wybranych metali w glebach Polski przedstawiono na rysunkach 16 i 17.

Na podstawie powyższych danych i aktualnie obowiązujących w Polsce przepisów prawnych (17) można stwierdzić, że ponad 99% powierzchni użytków rolnych w skali kraju spełnia kryteria zawartości metali wymaganych dla gleb rolniczych. W najbardziej uprzemysłowionym województwie śląskim, w przypadku takich pierwiastków, jak: kadm, cynk i ołów, gleby zanieczyszczone stanowią od 5 do 10% gleb użytkowanych rolniczo. Fakt ten związany jest z oddziaływaniem przemysłu wydobywczego i przetwórczego rud cynku i ołowiu (emisje pyłów) zlokalizowanego w wielu ośrodkach regionu, a w dużym stopniu również z występowaniem wychodni skał rudonośnych na powierzchni. Wyższe zawartości metali na poziomie przekraczającym wartości progowe występują także lokalnie w glebach innych regionów historycznie obciążonych skutkami wydobywania i przeróbki rud metali (Głogów, Lubin, Chrzanów, Olkusz).

Mimo na ogół niskiego poziomu zawartości metali śladowych w glebach na wielu obszarach stwierdza się przekroczenia dopuszczalnej ich zawartości w roślinach (tab. 13).

Tabela 12

Udział gleb nie zanieczyszczonych na obszarach użytkowanych rolniczo według standardów przyjętych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r.
Wyniki monitoringu gleb użytków rolnych w latach 1992–1997

Województwo	Liczba punktów pomiarowych	Udział gleb nie zanieczyszczonych (%)				
		miedź	nikiel	ołów	cynk	kadm
Dolnośląskie	3037	99,67	99,87	99,47	99,44	100,00
Kujawsko-pomorskie	2810	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Lubelskie	3929	99,95	100,00	99,92	100,00	99,95
Lubuskie	1328	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Łódzkie	3195	99,91	100,00	99,78	99,53	99,81
Małopolskie	2393	99,96	99,75	97,33	98,79	99,25
Mazowieckie	5534	100,00	100,00	99,98	99,98	100,00
Opolskie	1610	99,94	100,00	99,69	99,57	99,57
Podkarpackie	2439	99,96	99,96	99,96	100,00	99,96
Podlaskie	2778	100,00	99,96	99,96	99,96	100,00
Pomorskie	2193	99,95	100,00	99,91	99,95	99,91
Śląskie	2059	100,00	99,81	90,19	91,69	94,37
Świętokrzyskie	1923	100,00	100,00	99,95	100,00	99,95
Warmińsko-mazurskie	3048	100,00	99,97	99,93	99,90	100,00
Wielkopolskie	4350	100,00	100,00	99,89	99,82	99,98
Zachodniopomorskie	2642	100,00	100,00	99,96	99,89	100,00
Polska	45 268	99,96	99,96	99,31	99,43	99,66

Źródło: Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. (17).

Podobnie w sytuacji, gdy co najmniej 95% wyników reprezentujących około 35 tys. analiz próbek roślinnych zestawionych w tabeli 12 pochodzi z gleb spełniających standardy jakości gleby dla kadmu, to jednak znaczący odsetek tych próbek charakteryzuje się przekroczeniem jego zawartości dopuszczalnej ($0,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) określonej w dyrektywie unijnej. Szczególnie narażona na przekroczenia zawartości kadmu jest marchew, bowiem aż 50% badanych próbek marchwi charakteryzuje się nadmierną zawartością tego pierwiastka. Świadczy to o istotnym wpływie jakości gleb na stan jakości płodów rolnych – dodać należy, że mechanizm nadmiernego gromadzenia kadmu w roślinach nie jest związany wyłącznie z zawartością tego pierwiastka w glebach, którą ocenia się jako znacznie niższą od przeciętnej dla gleb Europy. Nadmierna akumulacja kadmu w roślinach ma przede wszystkim związek z silnym zakwaszeniem gleb decydującym o wysokiej biodostępności kadmu (rys. 18).

Powyższy przykład wskazuje na potrzebę uwzględnienia w kryteriach oceny zanieczyszczenia gleb metalami właściwości gleb, decydujących o warunkach pobierania metali przez rośliny. Zastosowanie kryteriów IUNG (12) do oceny przydatności konsumpcyjnej i paszowej płodów rolnych potwierdza, że na niektórych glebach zakwalifikowanych jako czyste zachodzi nadmierne pobieranie metali przez rośliny,



Rys. 16. Przestrzenna ocena zanieczyszczenia kadmem gleb użytkowanych rolniczo w Polsce (1992–1997) na podstawie klas zawartości określonych według kryteriów IUNG (n = 45 278)
Źródło: Terelak H. i in., 1999b (25).

Tabela 13

Rozkład zawartości kadmu w plonach roślin według danych monitoringowych z całego kraju

Roślina uprawna	Fraktyl									
	0,50	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,93	0,95	0,99	0,999
Żyto	0,03	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10	0,11	0,12	0,25	1,18
Pszenica	0,08	0,10	0,11	0,12	0,14	0,16	0,19	0,22	0,44	0,95
Jęczmień jary	0,05	0,07	0,08	0,09	0,10	0,12	0,13	0,14	0,42	1,20
Owies	0,09	0,12	0,14	0,16	0,19	0,23	0,27	0,32	1,03	1,55
Pszenżyto	0,05	0,08	0,09	0,10	0,11	0,13	0,18	0,21	0,64	1,24
Kukurydza na ziarno	0,04	0,07	0,08	0,08	0,12	0,19	0,22	0,30	0,72	0,72
Strączkowe	0,08	0,21	0,24	0,27	0,32	0,35	0,39	0,43	0,64	0,90
Ziemiak	0,11	0,16	0,18	0,21	0,23	0,29	0,33	0,37	0,77	5,24
Burak cukrowy	0,10	0,15	0,16	0,19	0,22	0,29	0,33	0,39	0,54	1,58
Marchew jadalna	0,21	0,42	0,49	0,58	0,69	0,89	1,08	1,31	1,72	2,21
Kapusta	0,10	0,15	0,16	0,17	0,20	0,24	0,30	0,36	0,61	1,08

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 17. Przestrzenna ocena zanieczyszczenia ołowiem gleb użytkowanych rolniczo w Polsce (1992–1997) na podstawie klas zawartości określonych według kryteriów IUNG (n = 45 278)
 Źródło: Terelak H. i in., 1999c (26).

Tabela 14

Udział roślin spełniających kryteria przydatności konsumpcyjnej i paszowej pod względem zawartości kadmu w zależności od stopnia zanieczyszczenia gleb tym pierwiastkiem

Stopień zanieczyszczenia gleb	Przydatność rośliny (%)			
	konsumpcyjna	paszowa	przemysłowa	razem
0	75,6	21,3	3,1	100
I	47,1	39,7	13,2	100
II	21,8	50,1	28,1	100
III	11,2	43,9	44,9	100
IV	8,0	47,6	44,4	100
V	0	44,0	56,0	100
Razem	72,2	23,4	4,4	100

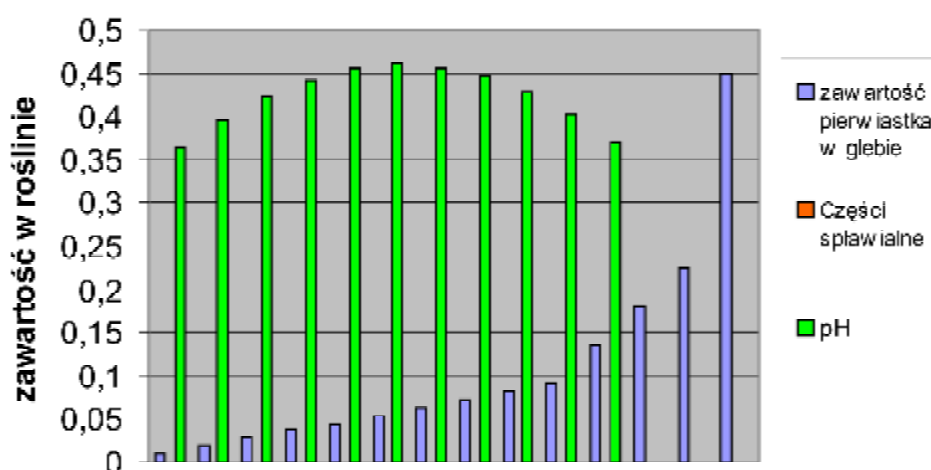
Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 15

Udział roślin spełniających kryteria przydatności konsumpcyjnej i paszowej pod względem zawartości ołowiu w zależności od stopnia zanieczyszczenia gleb tym pierwiastkiem

Stopień zanieczyszczenia gleb	Przydatność rośliny (%)			
	konsumpcyjna	paszowa	przemysłowa	razem
0	82,0	17,8	0,2	100
I	65,1	33,9	1,0	100
II	48,8	46,5	4,7	100
III	47,8	44,6	7,6	100
IV	36,4	45,4	18,2	100
V	0,0	0,0	0,0	0,0
Razem	81,4	18,4	0,2	100

Źródło: Opracowanie własne.



Rys. 18. Wpływ całkowitej zawartości kadmu w glebie, zawartości frakcji splawialnej i odczynu na zawartość kadmu w korzeniach marchwi

Źródło: Opracowanie własne.

w tym zwłaszcza kadmu. Wyniki analiz blisko 35 tys. próbek roślinnych wskazują, że na glebach o niskiej zawartości kadmu jego biodostępność jest stosunkowo wysoka (tab. 14 i 15), najprawdopodobniej ze względu na silne zakwaszenie gleb Polski. W kontekście analizy ryzyka przykład ten ilustruje potrzebę szerszej dyskusji nad podejściem do wartości progowych i metod analizy ryzyka nie tylko w kraju, ale również w Europie.

Podsumowanie

Dostępne współcześnie metody kartografii cyfrowej oraz modele matematyczne umożliwiają prezentację i analizę zjawisk przyrodniczych w postaci ciągłych warstw informacji w odpowiedniej skali, dzięki czemu nie zachodzi arbitralna agregacja wskaźników do poziomu jednostek administracyjnych. Zastosowanie metod modelowania warunków glebowo-przyrodniczych opisujących przestrzeń ma duże znaczenie w perspektywie zmian klimatu i występowania zjawisk ekstremalnych. Zjawiskiem o szczególnym znaczeniu są susze atmosferyczne, których skutki są silnie zróżnicowane w zależności od zdolności retencyjnych pokrywy glebowej. Poznanie dynamiki suszy glebowej i jej skutków, niezbędne dla opracowania systemów prognostycznych, wymaga zmiany podejścia do organizacji zbierania danych. Dotyczy to zwłaszcza objęcia stałą obserwacją wilgotności gleb oraz plonów poszczególnych gatunków roślin w sposób reprezentatywny dla zróżnicowania pokrywy glebowej oraz zmienności warunków klimatycznych w Polsce.

Jednym ze sposobów oceny klimatycznej zmienności warunków plonowania roślin uprawnych w Polsce jest wykorzystanie statystyczno-empirycznych modeli prognoz plonów - IPO. W modelach IPO wykorzystuje się koncepcję tzw. indeksu pogodowego (IP), który wyraża wpływ elementów meteorologicznych na potencjalne plony. Indeks ten jest wielokrotną funkcją elementów meteorologicznych agregowanych w okresach dekadowych lub miesięcznych. Analiza warunków plonowania głównych roślin uprawnych w Polsce w ostatnich 40 latach za pomocą indeksów pogodowych wskazuje, że decydującym czynnikiem wpływającym na wielkość uzyskiwanych plonów w Polsce staje się susza w okresie wiosenno-letnim.

W perspektywie zmian klimatu istnieje konieczność innego podejścia do waloryzacji warunków glebowo-przyrodniczych i wykorzystania metod modelowania umożliwiających dynamiczny opis relacji pomiędzy plonowaniem różnych gatunków roślin a parametrami jakości gleb i klimatu. Produkcję suchej masy poszczególnych gatunków roślin w określonych warunkach glebowych można wyrazić w funkcji ilości wody dostępnej dla roślin, zależną od właściwości retencyjnych pokrywy glebowej, opadów i ewapotranspiracji. Wstępne wyniki modelowania wskazują na przydatność tej metody do bardziej obiektywnej waloryzacji przestrzeni rolniczej, podlegającej przeobrażeniom w następstwie zmian klimatu. Syntetyczne ujęcie maksimów różnych ograniczeń siedliskowych dla produkcji rolniczej wskazuje na częste współwystępowanie niekorzystnych czynników w przestrzeni rolniczej. Przeprowadzone analizy wskazują także na istotną rolę czynników technologicznych i organizacyjnych w wykorzystaniu potencjału siedliska oraz w kompensacji ograniczeń wynikających z uwarunkowań glebowo-przyrodniczych.

Rozwijane modele można również wykorzystać jako element monitoringu suszy glebowej.

W ochronie gleb, w perspektywie wdrażania wspólnotowej polityki ochrony gleb, istotnym zagadnieniem pozostaje wydzielenie obszarów zagrożonych różnymi formami degradacji oraz opracowanie adekwatnych programów zapobiegawczych. Doty-

czy to między innymi takich zagrożeń, jak: spadek zawartości materii organicznej, erozja, zagęszczenie gleb oraz zanieczyszczenia. Pomiary porównawcze wykonane w profilach wzorcowych wskazują na znaczący, na przestrzeni ostatnich 30 lat, ubytek węgla w siedliskach o średnich i wysokich zasobach materii organicznej oraz akumulację próchnicy w kompleksach gleb najsłabszych. Bilans materii organicznej opracowany w ujęciu przestrzennym dla ostatnich trzech dekad jest ujemny i wskazuje na emisję netto dwutlenku węgla z gleb użytkowanych rolniczo. Stan ten wymaga nowego podejścia do instrumentów ochrony gleb, realizowanych w ramach programów rolnośrodowiskowych. W perspektywie upowszechniania intensywnych technologii uprawy znaczące powierzchnie gleb w województwach dolnośląskim i opolskim są wysoce narażone na zagęszczenie.

Poważnym zagrożeniem dla jakości gleb w Polsce jest około 30% udział gleb bardzo kwaśnych w pokrywie glebowej, prowadzący do uruchamiania metali śladowych w środowisku. Jedną z konsekwencji zakwaszenia gleb jest nadmierna akumulacja niektórych metali w roślinach. Znajduje to potwierdzenie w przedstawionych wynikach badań monitoringowych, przy czym zjawisko to dotyczy nie tylko obszarów przemysłowych, ale również rolniczych charakteryzujących się zawartością metali w glebach na poziomie tła naturalnego.

Opracowana z wykorzystaniem funkcji pedotransferu mapa podatności gleb na zagęszczenie stanowi pierwsze zobrazowanie zagrożeń dla fizycznej jakości gleb w Polsce, w perspektywie spodziewanej intensyfikacji uprawy. Obszary te wymagają odrębnego podejścia w przyszłych programach rolnośrodowiskowych zarówno ze względu na niekorzystny wpływ zagęszczenia na plonowanie roślin, jak i pogorszenie warunków retencji wody w krajobrazie rolniczym.

Literatura

1. Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M.: Crop evapotranspiration. Rome, Italy, FAO Irrig. and Drain. Paper, FAO, 2000, **56**.
2. Climatological Normals (CLINO) for the period 1961–1990. WMO, 847.
3. Fenton T. E., Brown J. R., Maubach M. J.: Effects of long-term cropping on organic matter content of soils: Implication for soil quality. Soil and Water Con. J., 1999.
4. Górski T., Koter M.: Bonitacja agroklimatu Polski (w skali 10-punktowej). Mapa w skali 1:1000 000. IUNG Puławy, Wyd. Geologiczne, 1977.
5. Górski T., Krasowicz S., Kuś J.: Glebowo-klimatyczny potencjał Polski w produkcji zbóż. Pam. Puł., 1999, **114**: 127-142.
6. Górski T., Zaliwski A.: Model agroklimatu Polski. Pam. Puł., 2002, **130(1)**: 251-260.
7. Górski T.: Zmiany warunków agroklimatycznych i długość okresu wegetacyjnego w ostatnim stuleciu. W: Długotrwałe przemiany krajobrazu Polski w wyniku zmian klimatu i użytkowania ziemi. Poznań, IGBP - Global Change, 2006.
8. Górski T., Demidowicz G., Deputat T., Górka K., Marcinkowska I., Szpota W.: Empiryczny model plonowania pszenicy ozimej w funkcji czynników meteorologicznych. Zesz. Nauk. AR Wrocław, Konf., 1997, **313(175)**: 254-260.

9. Horn R., Czyż E., de la Rosa D., Dexter A., Dumitru E., Fleige H., Mayol F., Rajkay K., Simota C.: SIDASS EU Project: A spatial distributed simulation model predicting the dynamics of agrophysical state within Western and Eastern European countries for the selection of management practices preventing soil erosion. IC15-CT98-0106, 2001.
10. Józefaciuk A., Józefaciuk C z.: Mechanizm i wskazówki metodyczne badania procesów erozji. Bibl. Monit. Środ., PIOŚ, Warszawa, 1996.
11. Józefaciuk A., Józefaciuk C z.: Ochrona gruntów przed erozją. Poradnik dla władz administracyjnych i samorządowych oraz służb doradczych i użytkowników gruntów. IUNG Puławy, 1999.
12. Kabata-Pendias A., Dudka S., Chłopecka A., Gawinowska T.: Background levels and environmental influences on trace metals in soils of the temperate humid zone of Europe. W: Biogeochemistry of trace metals (Ed. D. Adriano). Lewis Publishers, 1992.
13. Kozyra J., Górski T.: Wpływ zmian klimatu na uprawę roślin w Polsce. W: Klimat-Środowisko-Człowiek. Wrocław, Polski Klub Ekologiczny, Okręg Dolnośląski, 2004.
14. Kozyra J., Pudełko R., Mizak K.: Wykorzystanie modelu agroklimatu Polski do analiz agrotopoklimatycznych na przykładzie gminy Korczyna. Acta Agroph., 2005, **6(1)**: 133-144.
15. Kozyra J.: Climatic conditions for millet cultivation in Poland. CagM Report, Genewa, Switzerland, WMO, 2004, 94.
16. Lebert M., Horn R.: A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. Soil Till. Res., 1991, **19**.
17. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 roku w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi. Dz. U. Nr 165, poz. 1359.
18. Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 9 maja 2007 roku w sprawie wartości klimatycznego bilansu wodnego dla poszczególnych gatunków roślin uprawnych i gleb. Dz. U. Nr 90, poz. 60.
19. Shibu M.E., Leffelaar P.A., Van Keulen H., Aggarwal P.K.: Quantitative description of soil organic matter dynamics - A review of approaches with reference to rice-based cropping systems. Geoderma, 2006, **137**.
20. Ślusarczyk E.: Określenie retencji użytecznej gleb marginalnych dla programowania i projektowania nawodnień. Melioracje rolne, 1979, **3(53)**.
21. Strzemski M.: Przyrodniczo-rolnicza bonitacja gruntów ornych. IUNG Puławy, 1972.
22. Stuczyński T., Czyż E., Dobers S., Gawrysiak L., Jadczyżyn J., Korzeniowska-Puculek R., Kozyra J., Kukla H., Łopatka A., Nowocień E., Pudełko R., Pidvalna H., Siebielec G.: Wdrożenie zintegrowanego systemu o rolniczej przestrzeni produkcyjnej województwa podlaskiego. IUNG-PIB Puławy, 2006.
23. Stuczyński T., Filipiak K., Kozyra J., Górski T., Jadczyżyn J. (red.): Obszary o niekorzystnych warunkach gospodarowania w Polsce. IUNG-PIB Puławy, 2006.
24. Terelak H., Piotrowska M., Budzyńska K., Pietruch Cz., Wróblewska E., Zaliwski A.: Stan zanieczyszczenia gleb kadmem (mapa). IUNG Puławy, 1999a.
25. Terelak H., Piotrowska M., Budzyńska K., Pietruch Cz., Wróblewska E., Zaliwski A.: Stan zanieczyszczenia gleb kadmem (mapa). IUNG Puławy, 1999b.
26. Terelak H., Piotrowska M., Budzyńska K., Pietruch Cz., Wróblewska E., Zaliwski A.: Stan zanieczyszczenia gleb kadmem (mapa). IUNG Puławy, 1999c.
27. Terelak H., Motowicka-Terelak T., Maliszewska-Kordybach B., Pietruch Cz.: Monitoring chemizmu gleb ornych Polski. Program badań i wyniki 1995 i 2000. Bibl. Monit. Środ., Warszawa, 2002.
28. Terelak H., Motowicka-Terelak T., Wróblewska E., Gawrysiak L., Pietruch Cz.: Mapa zawartości substancji organicznej w glebach użytków rolniczych Polski. IUNG Puławy, 2001.
29. Terelak H., Stuczyński T., Piotrowska M.: Heavy metals in agricultural soils in Poland. Pol. J. Soil Sci., 1997, **30**.

30. V a n B a v e l C., S c h a l l e r F.: Soil aggregation, organic matter, and yields in a long-time experiment as affected by crop management. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1950, **15**.
31. W a w e r R., N o w o c i e ń E.: Aktualne zagrożenie erozją gleb w Polsce. W: Sprawdzenie przydatności wskaźników do oceny zrównoważonego gospodarowania zasobami środowiska rolniczego w wybranych gospodarstwach, gminach i województwach. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2007, **5**: 157-168.
32. W a w e r R., N o w o c i e ń E.: Mapa erozji wodnej aktualnej w oparciu o CORINE Land Cover 2000. Pam. Puł., 2006, **142**: 537-546.
33. W e l f e W., W e l f e A.: Ekonometria stosowana. PWE Warszawa, 1996.
34. W i t e k T., G ó r s k i T.: Przyrodnicza bonitacja rolniczej przestrzeni produkcyjnej w Polsce. Wyd. Geologiczne, Warszawa, 1977.
35. Z a w a d z k i S.: Gleboznawstwo. PWRiL Warszawa, 1999.

Adres do korespondencji:

dr Tomasz Stuczyński
Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów
IUNG-PIB

ul. Czartoryskich 8
24-100 Puławy
tel.: (081) 886 34 21 w. 311
e-mail: ts@iung.pulawy.pl

