

Janusz Smagacz

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

KIERUNKI ROZWOJU RÓŻNYCH SYSTEMÓW UPRAWY ROLI W WARUNKACH ZMIENIAJĄCEGO SIĘ KLIMATU*

Słowa kluczowe: zmiany klimatu, rolnictwo zrównoważone, konserwująca uprawa roli

Wstęp

Znaczna degradacja środowiska glebowego spowodowana intensywnym oddziaływaniem maszyn i narzędzi uprawowych wymusza poszukiwanie nowych technik uprawy roli sprzyjających ochronie gleby i odtwarzaniu naturalnych biocenoz na obszarach o intensywnej produkcji rolnej. Rolnictwo zrównoważone, wpływając korzystnie na środowisko przyrodnicze, zakłada wzrost produkcji rolnej przy jednoczesnym zachowaniu bioróżnorodności w agrocenozach, a dodatkowo ogranicza w znacznym stopniu mineralizację glebowej materii organicznej (próchnicy), erozję i zagęszczenie gleby, wymywanie składników pokarmowych i akumulację związków toksycznych w glebie (6). W ostatnich latach w wielu krajach UE w ramach rozwoju koncepcji rolnictwa zrównoważonego propaguje się w coraz większym stopniu różne techniki bezorkowej uprawy roli, często określanej mianem uprawy zachowawczej lub konserwującej.

Uprawa zachowawcza – konserwująca (ang. *conservation tillage*) jest koncepcją produkcji rolniczej, której głównym celem jest zachowanie naturalnych zasobów przyrody przy równoczesnym osiąganiu wysokich plonów. Uprawa ta bazuje na wspieraniu naturalnych procesów biologicznych w glebie. Wszelkiego rodzaju zabiegi uprawowe są zredukowane do niezbędnego minimum. Środki produkcji pochodzenia organicznego lub syntetycznego są w tym systemie uprawy w ten sposób stosowane, aby nie naruszać biologicznych procesów odtwarzających życie biologiczne i naturalnej struktury gleby (8). Uprawę konserwującą określają trzy podstawowe cechy:

- długotrwała, znacznie ograniczona intensywność spulchniania roli;

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.1 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

- całoroczne przykrycie powierzchni gleby mulczem z resztek poźniwnych lub roślin okrywowych (międzyplonów);
- znacznie zróżnicowane zmianowanie uwzględniające stosowanie roślin bobowatych i międzyplonów.

Podstawową zaletą uprawy konserwującej jest nieodwracanie wierzchniej warstwy gleby, co w praktyce przekłada się na eliminację pługa jako podstawowego narzędzia uprawowego. W zależności od intensywności i głębokości uprawy na powierzchni gleby lub w przypowierzchniowej jej warstwie pozostawione są resztki pozbiorowe rośliny przedplonowej lub międzyplonu (17). Uprawa zerowa, po której następuje siew bezpośredni, jest skrajnym wariantem uprawy konserwującej, przy którym uprawa roli ogranicza się do spulchnienia jedynie bruzdki siewnej. W trakcie przejazdu agregatem następuje wysianie nasion na dno rowka siewnego w nieuprawioną rolę i ich przykrycie. Uprawa zachowawcza to również taki system uprawy roli, który w porównaniu z konwencjonalną, płużną uprawą pozostawia na powierzchni gleby przynajmniej 30% resztek poźniwnych (6). Europejskie Stowarzyszenie Rolnictwa Konserwującego określa ten system uprawy jako sposób zagospodarowania gleby zmniejszający destabilizację w jej strukturze i bioróżnorodności. System ten ogranicza w znacznym stopniu degradację gleby i straty wody, co dobrze wpisuje się w ograniczanie negatywnego wpływu zmian klimatu na środowisko. W związku z powyższym, w ostatnich latach zadania uprawy roli uległy pewnemu przewartościowaniu i polegają zasadniczo na:

- gromadzeniu wody w glebie i minimalizowaniu bezproduktywnych jej strat;
- ograniczeniu strat glebowej materii organicznej – wzrost sekwestracji węgla organicznego w glebie;
- zwiększeniu biologicznej aktywności gleby;
- ograniczeniu nasilenia erozji wodnej i wietrznej;
- poprawie struktury i zmniejszeniu zlewności oraz skłonności gleby do zaskorupiania;
- ograniczeniu spływów i wymywania składników nawozowych;
- zmniejszeniu kosztów uprawy, czasu pracy oraz zużycia energii.

Celem opracowania jest przedstawienie kierunków rozwoju różnych systemów uprawy roli w aspekcie zmian klimatu. Opracowanie ma charakter przeglądowy. Wyniki badań własnych nad porównaniem różnych systemów uprawy roli konfrontowano z wynikami ocen innych autorów, prezentowanymi w literaturze. Analizę porównawczą różnych systemów uprawy roli przedstawiono w sposób wieloaspektowy.

Przesłanki do wprowadzania modyfikacji w uprawie roli

Tradycyjny – plużny system uprawy roli obecnie dominuje w rolnictwie naszego kraju. Niewątpliwą zaletą plużnej techniki uprawy roli jest dokładne przykrycie nawozów naturalnych i organicznych oraz równomierne rozmieszczenie w warstwie

ornej gleby składników nawozowych. Korzystne oddziaływanie orki polega również na głębokim przykryciu osypanych nasion chwastów i nasion rośliny przedplonowej, dobrym napowietrzeniu gleby oraz likwidacji głębokich kolein powstających podczas zbioru płodów rolnych w niekorzystnych warunkach wilgotnościowych. Jednakże taki system przygotowania pola pod zasiew może prowadzić do wielu negatywnych zmian środowiska glebowego, dlatego od pewnego czasu można zauważyć tendencję do ciągłego zmniejszania liczby i głębokości zabiegów uprawowych, a w szczególności orki. Duża głębokość i intensywność spulchniania przyspiesza proces mineralizacji próchnicy (5), a jej straty po dwudziestoletniej intensywniej uprawie mogą sięgać nawet 50% (15). Ubytek substancji organicznej wywiera negatywny wpływ na strukturę gleby, pojemność wodną i biologiczną aktywność. Wzrasta również podatność na erozję wodną i wietrzną, szczególnie na dużych polach pozbawionych zadrzewień śródpolnych lub w dużych odległościach od obszarów leśnych (9). Następuje też przesuszenie warstwy ornej, zmniejsza się nośność gleby, a stosowanie ciężkich ciągników do prac uprawowych i transportowych często powoduje nadmierne jej zagęszczenie, w tym również warstwy podornej (1, 24). Gleba po orce wymaga doprawienia, co zwiększa koszty uprawy, zużycie energii i czasu pracy oraz stwarza problemy z dotrzymaniem właściwych terminów agrotechnicznych.

W ujęciu amerykańskim uprawa zachowawcza to system uprawy roli, który w porównaniu z konwencjonalną, płużną uprawą pozostawia na powierzchni gleby przynajmniej 30% resztek poźniwnych. W Niemczech natomiast uprawa zachowawcza jest definiowana jako uprawa, której intensywność oddziaływania na glebę jest mniejsza od uprawy konwencjonalnej (system uprawy płużnej), zaś większa od uprawy zerowej (7). Europejskie Stowarzyszenie Rolnictwa Konserwującego określa ten system uprawy jako sposób zagospodarowania gleby zmniejszający destabilizację w jej strukturze i bioróżnorodności (34).

Wydaje się, że takie przygotowanie pola pod zasiew powinno być w większym stopniu upowszechnione zarówno na obszarze Polski, jak i w całej Europie. Przedstawione fakty sugerują potrzebę ciągłego zmniejszania liczby i intensywności wykonywanych zabiegów uprawowych, a nawet całkowitego ich wyeliminowania. Upraszczając uprawę można bowiem poprawić stabilność struktury gleby, zwiększyć infiltrację wody i usprawnić jej przewietrzanie poprzez wytworzenie stabilnego układu dużych porów. Proponowane zmiany w systemie uprawy roli mogą w znacznym stopniu ograniczyć erozję wodną i wietrzną, zwiększyć zawartość próchnicy i zmniejszyć koszty prac polowych (31, 35).

Aktualnie znaczenie uprawy roli, jako zabiegu udostępniającego składniki pokarmowe dla roślin uprawnych oraz odpowiedzialnego za ograniczenie zachwaszczenia nie jest już priorytetem i większą uwagę zwraca się na ochronę środowiska przyrodniczego – ochronę gleby, wody i klimatu. Istotną przesłanką skłaniającą do wprowadzenia modyfikacji w uprawie roli jest również aspekt organizacyjny. Wykonanie, jeśli jest to możliwe, wszystkich zabiegów uprawowych i agrotechnicznych, jak uprawa roli, podanie sztucznych nawozów

mineralnych (posypowo lub wgłębnie), siew nasion podczas jednego, maksymalnie dwóch przejazdów roboczych, umożliwia dotrzymanie optymalnych terminów agrotechnicznych, co jednocześnie poprawia wskaźniki ekonomiczne, np. jednostkowe zużycie paliwa, czas pracy i korzystnie wpływa na uzyskiwany dochód z gospodarstwa.

Ciekawym rozwiązaniem jest tzw. pasowa uprawa roli, która polega na spulchnieniu pasa gleby jedynie wzdłuż przyszłych rzędów rośliny uprawnej. Po pasowym spulchnieniu, nawet do 30 cm, wykonuje się nawożenie i siew nasion. Wszystkie te zabiegi można przeprowadzić w trakcie jednego przejazdu zestawem składającym się z maszyny spulchniającej glebę, siewnika i aplikatora umożliwiającego rzędowe (zlokalizowane) stosowanie nawozu. Pierwotnie ten system uprawy wykorzystywany był pod rośliny uprawiane w szerokich rzędach 45 i 75 cm i siewem przy użyciu siewników punktowych, np. kukurydza, burak cukrowy, słonecznik. W późniejszym okresie pojawiła się wersja, w której uprawiane pasy są oddalone od siebie o 30–35 cm, a siew odbywa się za pomocą nabudowanego siewnika rzędowego. Mogą one być używane do pasowej uprawy zbóż, rzepaku, roślin bobowatych (strączkowych) a nawet międzyplonów. Ważniejsze zalety uprawy pasowej są następujące:

- gleba nie jest uprawiana na całej powierzchni pola;
- zachowana zostaje właściwa jej struktura;
- przeciwdziałanie ugniataniu (zagęszczeniu) gleby wskutek przejazdu maszyn i narzędzi uprawowych – lepsza nośność gleby;
- zminimalizowanie bezproduktywnych strat wody – mniejsze parowanie z gleby;
- gromadzenie (sekwestracja) węgla organicznego;
- małe zagrożenie erozją wodną i wietrzną;
- zoptymalizowane nawożenie i efektywniejsze wykorzystanie składników pokarmowych przez rośliny uprawne (nawożenie wgłębne);
- zdecydowanie mniejsze nakłady energetyczne (zużycie paliwa) i czasu pracy w porównaniu z uprawą tradycyjną.

Oddziaływanie na środowisko

Konserwująca uprawa roli (system bezorkowy, uprawa zerowa, po której następuje siew bezpośredni, uprawa pasowa, tzw. strip-till) charakteryzująca się pozostawieniem resztek roślinnych na powierzchni pola modyfikuje właściwości fizyczne, chemiczne i biologiczne gleby. W odniesieniu do fizycznych właściwości panuje opinia, iż uproszczona uprawa roli, jak również siew bezpośredni prowadzą do zwiększenia zagęszczenia gleby, co rzeczywiście ma miejsce w pierwszych latach stosowania takiego sposobu przygotowania pola pod zasiew. Jednakże w dłuższym okresie czasowym, w wyniku zmniejszenia częstotliwości przejazdów maszyn i narzędzi uprawowych, wzrostu zawartości glebowej materii organicznej (próchnicy), powstaniu trwałej struktury gruzelkowatej i zwiększeniu życia biologicznego, zwiększa się retencja wodna, poprawia nośność gleby, zaś wyraźnemu zmniejszeniu ulegają erozyjne straty składników mineralnych i próchnicy. Wyniki tych badań zostały przedstawione, między innymi, we wcześniejszych opracowaniach własnych (31-33) oraz innych autorów (1, 5, 24, 34).

Długoletnia bezpłuzna uprawa roli powoduje istotne zmiany właściwości fizycznych górnych i dolnych warstw gleby. Zwięzłość górnych poziomów gleby w pierwszych latach stosowania bezpłuznej uprawy roli jest najczęściej wyższa. Po okresie przejściowym (4-8 lat), w którym następują istotne zmiany warunków fizykochemicznych i biologicznych gleby, zarówno górne, jak i dolne warstwy gleby odznaczają się mniejszą zwięzłością i gęstością w porównaniu z wynikami uzyskanymi po uprawie płuznej. Wieloletnia uprawa bezpłuzna prowadzi do większej odporności gleby na ugniatanie w porównaniu z typową uprawą płuzną (36). W tabeli 1 przedstawiono zmienność cech fizycznych gleby lekkiej w zależności od ciężaru ciągnika i liczby przejazdów po tym samym śladzie.

Tabela 1

Zależność cech fizycznych gleby lekkiej od ciężaru ciągnika i liczby przejazdów

Ciągnik o ciężarze (kg)	Porowatość (%)	Pojemność powietrza (%)	Gęstość ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Wilgotność objętościowa (%)
bez ugniatania	49,2	34,0	1,36	15,1
1506 1 przejazd	42,2	25,7	1,57	16,4
2320 1 przejazd	37,1	19,3	1,68	17,8
2320 3 przejazdy	36,9	16,7	1,70	18,6
2320 10 przejazdów	33,4	13,4	1,78	20,0

Źródło: Kozicz, 1971 (16)

W badaniach tych stwierdzono, że ugniatanie gleby, niezależnie od jej kategorii agronomicznej, przejawia się bardzo wyraźnym przyrostem gęstości oraz spadkiem pojemności powietrznej. Zjawisku temu towarzyszy zazwyczaj zmniejszenie się ilości wody łatwo dostępnej dla roślin. Spadek porowatości i pojemności powietrznej oraz wzrost uwilgotnienia i gęstości objętościowej gleby jest zależny od masy ciągnika i liczby przejazdów po tym samym śladzie. Taki przejazd, szczególnie na glebach ciężkich i bardzo ciężkich, powoduje niszczenie trwałych agregatów glebowych, a w miejscach ugniatanych zmniejsza się porowatość, natomiast wzrasta ciężar objętościowy oraz hamowane jest przesiąkanie wód opadowych w głąb profilu glebowego. W rezultacie może to doprowadzić do zagęszczenia warstwy podornej, co z kolei w dużej mierze utrudnia rozwój systemu korzeniowego roślin. Można więc w dużym uproszczeniu stwierdzić, że zmiany cech fizycznych gleby regulują rozwój systemu korzeniowego, a co za tym idzie wpływają bezpośrednio na plonowanie roślin. Na tej podstawie można stwierdzić, że intensywna uprawa płuzna, w miarę wydłużenia okresu pomiędzy pierwszym a ostatnim zabiegiem wznuszającym glebę powoduje istotne zwiększenie zwięzłości i gęstości gleby oraz spadek porowatości ogólnej. Pogorszenie się wymienionych właściwości fizycznych gleby wpływa na niższe plony roślin (tab. 2).

Tabela 2

Wzrost (+) lub spadek (-) plonów roślin – obiekt kontrolny – bez ugniatania

Ciągnik o ciężarze (kg)	Gęstość objętościowa (g·cm ⁻³)	Burak pastewny	Pszenica jara	Owies
bez ugniatania	1,36	100	100	100
1506 1 przejazd	1,57	+0,2	+8,0	+4,3
2320 1 przejazd	1,68	-27,9	-8,9	-11,6
2320 3 przejazdy	1,70	-58,6	-52,2	-16,3
2320 10 przejazdów	1,78	-74,7	-55,0	-27,5

Źródło: Kozicz, 1971 (16)

Duża intensywność mechanicznego oddziaływania na glebę w trakcie orki destrukcyjnie wpływa na korzystne dla wzrostu roślin elementy jej struktury i jest często powodem wytworzenia się tzw. podeszwy płużnej, ograniczającej rozwój systemu korzeniowego. Oprócz wysokich kosztów uprawa tradycyjna prowadzi często do niekorzystnych zjawisk. Gleba po orce, przez długi okres pozbawiona okrywy roślinnej, narażona jest na bezpośrednie, destrukcyjne działanie opadów atmosferycznych i wiatrów, nasilających procesy erozyjne. Wymienione czynniki zwiększają spływ powierzchniowy powodujący wymywanie środków ochrony roślin i nawozów, co może być powodem niekorzystnych zmian w ekosystemach (29).

Przepuszczalność wodna gleby jest w dużym stopniu uzależniona od gęstości gleby. Zwiększona gęstość i zwięzłość gleby ogranicza przemieszczanie się wody w głąb profilu glebowego. Natomiast pionowy układ porów przyspiesza przesiąkanie wody. Również zwiększona masa mulczu oraz wyższa zawartość próchnicy poprawia przepuszczalność gleby w warunkach długoletniej uprawy konserwującej. Bezpośrednio po orce gleba wykazuje lepszą przepuszczalność wody w porównaniu z wariantami wieloletniej uprawy uproszczonej lub siewem bezpośrednim, jednak po kilku tygodniach następuje szybkie osiadanie roli i zwiększenie jej zagęszczenia w górnych warstwach.

Stabilna struktura gleby w wieloletniej uprawie konserwującej stwarza lepsze warunki dla rozwoju roślin w przeciągu całej wegetacji niż uprawa konwencjonalna. Uprawa bezpłużna bez warstwy ochronnej (mulczu), pozostawiając glebę w stanie znacznego zagęszczenia, stwarza korzystniejsze warunki wilgotnościowe tylko w krótkim okresie po wystąpieniu opadów. Po dłuższym okresie bezdeszczowym woda nagromadzona w powierzchniowych warstwach gleby paruje szybciej. W warunkach dużej ilości mulczu na powierzchni pola obserwuje się w pierwszych latach stosowania uprawy bezpłużnej wyższą wilgotność górnych warstw gleby w porównaniu z wilgotnością stwierdzoną w tradycyjnej uprawie płużnej. Większość badań z tego zakresu wskazuje na korzystne oddziaływanie bezpłużnych systemów

uprawy roli, głównie siewu bezpośredniego, na zwiększenie zawartości wody, szczególnie w górnych warstwach profilu glebowego (2, 25, 26, 28).

Zmniejszenie zagęszczenia wierzchniej warstwy gleby oraz duża warstwa mulczu w uprawie konserwującej warunkuje lepszą dostępność wody. W zależności od ilości doprowadzonej materii organicznej i klimatu wzrost substancji organicznej może wynosić 0,2% rocznie. Każdy 1% substancji organicznej może magazynować $150 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}$ więcej wody. Rośliny okrywowe redukują straty wody o około 30% w porównaniu z uprawą płużną (8).

Przeprowadzone przez Czyż i in. (4) badania dotyczące oceny wilgotności gleby w różnych systemach uprawy roli wskazują, że siew bezpośredni istotnie podwyższał średnie wartości wilgotności w warstwie 0–35 cm w porównaniu z uprawą tradycyjną. Zastosowanie techniki siewu bezpośredniego wpłynęło szczególnie korzystnie na wzrost wilgotności gleby na głębokości 0–5 cm. Podobne zależności zanotowano również w przypadku systemu uprawy uproszczonej w porównaniu z obiektem z płużną uprawą roli (tab. 3). Do podobnych wniosków doszli również Jaskulski i in. (13) – tab. 4 oraz Małecka i in. (22) – tab. 5.

Tabela 3

Wpływ systemu uprawy roli na uwilgotnienie gleby (% V)

Warstwa gleby	System uprawy roli		
	płużny	uproszczony	siew bezpośredni
0–5	24,9	24,9	27,3
5–10	24,1	25,1	25,3
10–15	22,7	24,3	24,4
20–25	23,5	23,6	25,6
30–35	23,3	24,2	25,7

Źródło: Czyż i in., 2010 (3)

Tabela 4

Wilgotność gleby (% wag.) w warstwie gleby 0–30 cm przed siewem i w okresie wegetacji kukurydzy w zależności od przedplonu i sposobu uprawy roli

Uprawa roli	Przedplon			Średnia
	pszenica ozima	jęczmień jary	kukurydza	
Przed siewem				
Płużna	11,4	11,6	11,5	11,5
Bezorkowa głęboka	11,3	11,8	11,9	11,7
Bezorkowa płytka	11,9	12,1	13,5	12,5
Średnia	11,5	11,9	12,3	-
NIR _(0,05) dla: przedplonu – r.n.; uprawy roli – 0,25; interakcji – 0,52				
Faza BBCH 32-37				
Płużna	9,3	9,4	9,9	9,5
Bezorkowa głęboka	9,5	9,6	9,7	9,6
Bezorkowa płytka	10,4	10,3	10,3	10,3
Średnia	9,7	9,8	10,0	-
NIR _(0,05) dla: przedplonu – r.n.; uprawy roli – 0,36; interakcji – r.n.				

Źródło: Jaskulski i in., 2015 (13)

Tabela 5

Wilgotność, gęstość objętościowa gleby oraz kapilarna pojemność wodna w zależności od systemu uprawy roli (średnio 2010–2011)

System uprawy roli	Wilgotność gleby (% v/v)		Gęstość objętościowa (g·cm ⁻³)		Kapilarna pojemność wodna (%)	
	warstwa gleby (cm)					
	0–10	10–20	0–10	10–20	0–10	10–20
Tradycyjny	15,3	17,9	1,46	1,66	37,6	30,2
Uproszczony	17,2	19,8	1,54	1,57	34,8	31,9
Siew bezpośredni	19,5	20,3	1,61	1,59	31,2	32,3
NIR _(0.05)	1,15	1,64	0,05	0,06	1,24	1,25

Źródło: Małecka i in., 2012 (22)

Wyniki badań własnych przeprowadzonych na różnych glebach i w zróżnicowanych siedliskach potwierdzają tezę o korzystnym oddziaływaniu uprawy konserwującej (system bezorkowy, uprawa pasowa, uprawa zerowa, po której następuje siew bezpośredni) na kształtowanie wilgotności gleby i dostępności wody dla roślin uprawnych (tab. 6–8).

Tabela 6

Wpływ techniki uprawy roli na uwilgotnienie gleby (% v·v⁻¹), RZD Kępa-Puławy (średnie z 5 terminów pomiarów, 2018 rok)

Głębokość (cm)	Uprawa roli		
	plużna	bezorkowa	pasowa
10	10,2 ^{a/*}	13,0 ^b	12,9 ^b
20	11,5 ^a	14,0 ^b	15,7 ^c
30	16,8 ^a	16,8 ^a	17,1 ^a
0–30	12,8 ^a	14,6 ^b	15,0 ^b

^{a/*}wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie

Źródło: opracowanie własne

Tabela 7

Wpływ techniki uprawy roli na uwilgotnienie gleby (% v·v⁻¹), Gospodarstwo Indywidualne Rogów (średnie z 5 terminów pomiarów, 2013 rok)

Uprawa roli	Głębokość (cm)						Średnia
	10	20	30	40	60	100	
Plużna	15,4	6,8	7,6	7,7	14,4	24,9	12,8
Bezorkowa	15,3	8,4	10,0	8,7	13,3	31,3	14,5
Zerowa	14,5	10,2	10,0	9,9	18,1	33,7	16,0

Źródło: opracowanie własne

Tabela 8

Wpływ techniki uprawy roli na uwilgotnienie gleby (% $v \cdot v^{-1}$), SD Jelcz-Laskowice
(średnio za 4 lata badań)

Warstwa gleby (cm)	Uprawa roli		
	plużna	bezorkowa	zerowa
0–5	10,7 ^{a/*}	12,4 ^b	14,8 ^c
5–10	12,5 ^a	14,4 ^b	14,5 ^b
10–15	13,5 ^a	15,2 ^b	14,0 ^{ab}
30–35	9,8 ^a	11,3 ^b	9,9 ^a

/*wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie

Źródło: opracowanie własne

Próchnica

Istotnym kryterium oceny różnych wariantów konserwującej uprawy roli (uprawa bezorkowa, uprawa zerowa, uprawa pasowa) stosowanych systematycznie w dłuższym okresie czasu jest określenie ich wpływu na niektóre chemiczne właściwości gleby.

Wieloletnie badania dotyczące wpływu różnych wariantów konserwującej uprawy roli na kształtowanie zawartości próchnicy wskazują na znaczne nagromadzenie materii organicznej w powierzchniowej warstwie gleby, co sprzyja intensywnemu rozwojowi mikroorganizmów glebowych (zwiększa się biologiczna aktywność gleby), ale jednocześnie może prowadzić do przejściowej immobilizacji azotu. Jednak po rozłożeniu materii organicznej (resztek pozbiorowych roślin uprawnych lub międzyplonu), w wyniku zwiększonej aktywności biologicznej gleby azot przechodzi ponownie w formy dostępne dla roślin. Po kilku latach stosowania takiej uprawy, w górnych warstwach gleby ustala się nowy stan równowagi pomiędzy zwiększoną zawartością węgla organicznego i formami mineralnymi azotu. Niższa temperatura gleby w warunkach siewu bezpośredniego i uprawy bezplużnej w okresie wiosennym warunkuje mniejszą dostępność N z pierwszej dawki startowej. W związku z powyższym, w warunkach długotrwałego stosowania uprawy zerowej, po której następuje siew bezpośredni, pierwsza dawka azotu powinna być odpowiednio zwiększona (5–8 kg N w czystym składniku na 1 tonę słomy) w porównaniu z ilością stosowaną w uprawie plużnej.

Badania przeprowadzone przez Kinsella (15) wykazały, że intensywna uprawa plużna może w ciągu 20 lat zmniejszyć zawartość substancji organicznej w glebie nawet o 50%. Straty substancji organicznej są spowodowane przyspieszoną mineralizacją próchnicy w wyniku intensywnego mieszania gleby oraz zwiększoną erozją wietrzną i wodną na polach bez okrywy roślinnej.

Wieloletnie badania przeprowadzone przez różnych autorów (3, 12) wskazują, że stosowanie konserwującej uprawy roli przyczynia się do podwyższenia zawartości węgla organicznego oraz azotu ogólnego w górnych warstwach gleby. Zwiększa się również zawartość przyswajalnego fosforu, potasu i magnezu w porównaniu z wartościami stwierdzonymi w warunkach tradycyjnej – plużnej uprawy roli. Podobne zależności stwierdzono również w badaniach Lenarta i Sławińskiego

(tab. 9). Wyniki te dobrze korespondują z wynikami badań uzyskanymi przez Smagacza (tab. 10).

Tabela 9

Wpływ 33-letniej uprawy płuźnej i siewu bezpośredniego na wybrane chemiczne właściwości gleby

Warstwa gleby	Uprawa	C _{org.}	N _{og.}	C:N	P	K	Mg
		g·kg ⁻¹			mg·kg ⁻¹		
0–10	pluźna	10,7 ^{a/*}	1,17 ^a	9,1 ^a	87,1 ^a	234 ^a	78,1 ^a
	siew bezpośredni	14,7 ^b	1,53 ^b	9,6 ^a	130,8 ^b	325 ^b	103,2 ^b
10–20	pluźna	10,1 ^a	1,12 ^a	9,0 ^a	81,4 ^a	153 ^a	77,9 ^a
	siew bezpośredni	11,7 ^b	1,31 ^b	8,9 ^a	99,3 ^b	157 ^b	88,8 ^a

^{a/*}wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie

Źródło: Lenart i Sławiński, 2010 (20)

Tabela 10

Zawartość próchnicy (%) po zbiorze pszenicy ozimej w zależności od systemu uprawy roli i warstwy gleby (GI Rogów, średnia z lat 2010–2013)

Warstwa gleby (cm)	System uprawy roli			Średnia
	płuźny	bezorkowy	siew bezpośredni	
0–5	1,58	2,04	2,14	1,92
5–15	1,70	1,68	1,56	1,65
15–30	1,43	1,24	1,30	1,32
NIR _(0,05) dla: systemu uprawy – 0,13; warstwy gleby – 0,19				

Źródło: Smagacz, 2016 (33)

Istotnym elementem oceny zastosowania uproszczeń uprawowych jest również ocena nakładów energetycznych w poszczególnych strumieniach energetycznych oraz wskaźnik efektywności energetycznej.

Wyniki badań przeprowadzonych przez K r a s o w i c z a i M a d e j a (18) dla trzech technik uprawy roli: uprawy tradycyjnej (płuźnej), bezorkowej i uprawy zerowej, po której następuje siew bezpośredni zawarto w tabelach 11–13. Przedstawiono w nich wyniki dotyczące efektywności energetycznej w doświadczeniach z pszenicą ozimą na różnych glebach, tj. lekkich, średnich i ciężkich.

Tabela 11

Wskaźnik efektywności energetycznej według różnych technologii uprawy pszenicy ozimej (SD Jelcz-Laskowice, gleba lekka, 2007–2009)

Wyszczególnienie	System uprawy roli		
	płuźny	bezorkowy	uprawa zerowa
Plon (t·ha ⁻¹)	4,97	4,69	4,04
Energia zużycia bezpośrednich nośników energii (MJ)	3047	2253	1535
Energia zużycia surowców i materiałów (MJ)	9373	9373	9697
Energia zużycia w czasie eksploatacji urządzeń i budynków (MJ)*	1845	1752	1571
Energia użytej pracy żywej (MJ)	349	327	268
Razem nakłady energetyczne (MJ) [N _e]	14613	13703	13070
Energia otrzymanych produktów roślinnych (MJ) [P _e]	80514	75978	65502
Wskaźnik efektywności energetycznej [P _e /N _e]	5,51	5,54	5,01

Źródło: Madej i Krasowicz, 2010b (18)

Tabela 12

Wskaźnik efektywności energetycznej według różnych technologii uprawy pszenicy ozimej
(SD Baborówko, gleba średnia, 2007–2009)

Wyszczególnienie	System uprawy roli		
	plużny	bezorkowy	uprawa zerowa
Plon ($t \cdot ha^{-1}$)	6,43	6,27	5,85
Energia zużycia bezpośrednich nośników energii (MJ)	3134	2485	1849
Energia zużycia surowców i materiałów (MJ)	8862	8862	8986
Energia zużycia w czasie eksploatacji urządzeń i budynków (MJ)*	1139	784	745
Energia użytej pracy żywej (MJ)	324	251	237
Razem nakłady energetyczne (MJ) (N_e)	13458	12381	11817
Energia otrzymanych produktów roślinnych (MJ) (P_e)	104166	101520	94824
Wskaźnik efektywności energetycznej (P_e/N_e)	7,74	8,20	8,02

Źródło: Madej i Krasowicz, 2010b (18)

Tabela 13

Wskaźnik efektywności energetycznej według różnych technologii uprawy pszenicy ozimej
(Gospodarstwo Indywidualne Rogów, gleba ciężka, 2007–2009)

Wyszczególnienie	System uprawy roli		
	plużny	bezorkowy	uprawa zerowa
Plon ($t \cdot ha^{-1}$)	7,24	7,32	6,70
Energia zużycia bezpośrednich nośników energii (MJ)	3245	2699	1872
Energia zużycia surowców i materiałów (MJ)	10947	10947	11298
Energia zużycia w czasie eksploatacji urządzeń i budynków (MJ)*	2172	1934	1879
Energia użytej pracy żywej (MJ)	348	321	308
Razem nakłady energetyczne (MJ) (N_e)	16712	15901	15357
Energia otrzymanych produktów roślinnych (MJ) (P_e)	117342	118584	108594
Wskaźnik efektywności energetycznej (P_e/N_e)	7,02	7,46	7,07

Źródło: Madej i Krasowicz, 2010b (18)

We wszystkich analizowanych przypadkach łączne nakłady energetyczne wydatkowane na produkcję z tradycyjną uprawą roli przewyższały nakłady w technologii z uprawą uproszczoną. Stąd też w warunkach uzyskiwania zbliżonych plonów w porównywanych systemach uprawy roli, wskaźnik efektywności energetycznej w technice bezorkowej – konserwującej przewyższał wskaźnik efektywności energetycznej w technice tradycyjnej – uprawa plużna (tab. 14).

Tabela 14

Porównanie wskaźników efektywności energetycznej (E_e) dla różnych technik uprawy roli pod pszenicę ozimą

Wyszczególnienie	Roślina	System uprawy roli					
		płuzny		bezorkowy		uprawa zerowa	
		plon	E_e	plon	E_e	plon	E_e
SD Jelcz-Laskowice	pszenica oz.	5,15	5,64	4,88	5,74	4,31	5,30
SD Baborówko	pszenica oz.	6,50	7,58	6,38	8,09	5,91	7,82
RZD Kępa	pszenica oz. po rzepaku	7,53	6,50	8,42	7,64	8,44	8,31
	pszenica oz. po pszenicy	7,83	6,59	8,14	7,23	7,55	7,14
GI Rogów	pszenica oz. po grochu	7,42	7,11	7,34	7,39	7,21	7,60
	pszenica oz. po pszenicy	6,87	6,59	6,95	7,00	6,31	6,65

Źródło: Madej i Krasowicz, 2010b (18)

Z badań przeprowadzonych przez Orzech i in. (23) wynika, że zarówno w produkcji poszczególnych roślin (pszenica ozima, bobik, jęczmień jary), jak i w całym zmianowaniu największą energochłonność wykazywała agrotechnika z tradycyjną (płuzną) uprawą roli, jednakże różnice w nakładach energii okazały się tu stosunkowo niewielkie (tab. 15).

Tabela 15

Nakłady na agrotechnikę i wartość zebranych plonów roślin w jednostkach energetycznych

Wyszczególnienie	Sposób uprawy roli		
	płuzny	uproszczony	siew bezpośredni
Pszenica ozima			
Nakłady energii (MJ/ha)	14 633	13 788	13 827
Wartość energetyczna plonu (MJ/ha)	88 248	81 477	78 859
Wskaźnik efektywności energetycznej	6,03	5,91	5,70
Bobik			
Nakłady energii (MJ/ha)	17 694	16 466	16 721
Wartość energetyczna plonu (MJ/ha)	58 858	53 866	47 893
Wskaźnik efektywności energetycznej	3,33	3,22	2,87
Jęczmień jary			
Nakłady energii (MJ/ha)	15 175	14 331	14 292
Wartość energetyczna plonu (MJ/ha)	41 769	36 141	33 915
Wskaźnik efektywności energetycznej	2,75	2,52	2,37
Średnio w zmianowaniu			
Nakłady energii (MJ/ha)	15 834	14 862	14 947
Wartość energetyczna plonu (MJ/ha)	62 956	57 165	53 556
Wskaźnik efektywności energetycznej	3,98	3,85	3,58

Źródło: Orzech i in., 2004 (23)

O efektywności energetycznej produkcji roślinnej w największym stopniu decydują uzyskane plony. Średnio za 6-lecie najwyższą wartość energetyczną plonu uzyskano

w pszenicy ozimej w systemie uprawy płuźnej, najniższą zaś w jęczmieniu jarym w warunkach siewu bezpośredniego. Generalnie bardziej energochłonna okazała się agrotechnika bobiku i jęczmienia jarego, niż pszenicy ozimej. Układ ten dotyczy całokształtu agrotechniki w zmianowaniu: bobik – pszenica ozima – jęczmień jary na glebie średniej (tab. 15).

Uproszczenia w uprawie roli, a zwłaszcza wprowadzenie siewu bezpośredniego spowodowały, iż w strukturze nakładów energetycznych (w porównaniu z tradycyjną uprawą płuźną) malał udział środków technicznych i paliwa, a wzrastał udział środków ochrony roślin (tab. 16). Prezentowane wyniki potwierdzają pogląd, iż w zależności od gatunku rośliny od 40 do 70% energii zużywanej w produkcji polowej przypada właśnie na uprawę roli, na co wskazują też między innymi badania G o n e t a (10) oraz D z i e n i i n. (6).

Tabela 16

Struktura nakładów energetycznych poniesionych na wykonanie produkcji roślinnej

Uprawa roli	Nakłady energetyczne (%)				
	siła robocza	środki techniczne i paliwo	nawozy mineralne	materiał siewny	środki ochrony roślin
Pszenica ozima					
Tradycyjna	9,1	18,7	49,2	14,2	8,8
Bezorkowa	8,8	13,6	52,9	15,2	9,5
Siew bezpośredni	10,6	7,6	52,1	15,0	17,7
Bobik					
Tradycyjna	12,9	28,5	38,9	17,3	2,5
Bezorkowa	12,8	25,0	41,3	18,3	2,6
Siew bezpośredni	14,7	14,0	41,2	21,0	9,1
Jęczmień jary					
Tradycyjna	11,9	27,5	45,4	10,9	4,3
Bezorkowa	11,8	24,1	48,1	11,5	4,6
Siew bezpośredni	13,5	13,2	48,2	14,2	10,9
Średnio w zmianowaniu					
Tradycyjna	11,3	24,9	44,5	14,1	5,2
Bezorkowa	11,1	20,9	47,4	15,0	5,6
Siew bezpośredni	12,3	11,6	47,2	16,7	11,6

Źródło: Orzech i in., 2004 (23)

W badaniach L e p i a r c z y k a i i n. (21) stwierdzono, że wartość energetyczna plonu ziarna pszenicy ozimej nie była w sposób istotny kształtowana systemem uprawy roli. Zaznaczyła się jedynie tendencja do mniejszej wydajności tego składnika w obiekcie z bezpłuźną uprawą roli. Największą wydajność energii, niezależnie od systemu uprawy roli, uzyskano z plonem ziarna pszenicy ozimej odmiany Turnia. Uprawa mieszaniny odmian (Rysa i Turnia) spowodowała zwiększenie wydajności energii w porównaniu z odmianą Rysa uprawianą w siewie czystym, chociaż różnice te nie były statystycznie potwierdzone (tab. 17).

Tabela 17

Wydajność energii ($\text{GJ} \cdot \text{ha}^{-1}$) pszenicy ozimej (średnie z lat 2006–2008)

Odmiana	System uprawy roli		Średnio
	tradycyjny	uproszczony	
Plon ziarna			
Turnia	106	102	104
Rysa	100	87	94
Mieszanina	105	92	99
Średnio	104	94	–
NIR _{0,05}	r.n.		5,7
	dla interakcji – r.n.		

r.n. – różnica nieistotna

Źródło: Lepiarczyk i in., 2010 (21)

Podsumowując, należy stwierdzić, że technika z konserwującą uprawą roli dzięki niższym nakładom energetycznym w poszczególnych strumieniach energetycznych oraz zbliżonym plonom w stosunku do techniki tradycyjnej, jest od niej bardziej efektywna energetycznie. Analiza energetyczna pozwala ponadto na porównywanie różnych technik uprawy roli pod względem ich efektywności na przestrzeni lat, z uwagi na fakt, iż analiza ta nie zależy od zmieniających się cen i relacji cenowych pomiędzy produktami rolniczymi i środkami produkcji stosowanymi w technologiach, co niejednokrotnie utrudnia ich porównywanie w latach oraz zmusza do częstej aktualizacji ocen.

Wpływ na emisje

W okresie ostatnich kilkunastu lat obserwuje się stały wzrost średniej temperatury powietrza w ciągu roku w porównaniu z wynikami z poprzedniego stulecia. Jednym z głównych powodów globalnego ocieplania klimatu jest zwiększona emisja gazów cieplarnianych, głównie CO_2 i N_2O , związana ze spalaniem różnorodnych nośników energetycznych oraz produkcją i stosowaniem nawozów azotowych.

Sektor rolniczy przyczynia się do wzrostu efektu cieplarnianego. Badania wykazały, że system uprawy konwencjonalnej (tradycyjna – płuźna uprawa roli) w porównaniu z innymi systemami uprawy roli (uprawa bezorkowa, uprawa zerowa) jest głównym powodem zwiększonego wydzielania dwutlenku węgla do atmosfery (19). Uwalnianie się CO_2 jest związane z mineralizacją próchnicy w wyniku intensywnego oddziaływania maszyn i narzędzi uprawowych na warstwę orną gleby. W warunkach uprawy konserwującej (systemy bezorkowe) następuje akumulacja humusu od 0,6–1,8 t/ha/rok. Jedna tona substancji organicznej może związać około 2 ton dwutlenku węgla (17). Znacznie podwyższona stabilność agregatów glebowych w systemie uprawy konserwującej prowadzi do sekwestracji węgla organicznego w glebie i ogranicza uwalnianie CO_2 do atmosfery (11). Intensywna uprawa płuźna natomiast degradowe stabilną strukturę gruzelkową, przyczyniając się do wzmożonej

emisji CO₂. Ograniczenie intensywności uprawy roli prowadzi również do znacznego zmniejszenia zużycia paliwa i mniejszego zanieczyszczenia środowiska. Smith i in. (30) wykazali, że zastąpienie tradycyjnej uprawy płużnej uprawą konserwującą może ograniczyć o około 4,1% ogólną emisję CO₂ do atmosfery.

Interesujących wyników dostarczyły też badania przeprowadzone przez Jarosz i in. (14) nad emisją CO₂ w uprawie kukurydzy na ziarno za pomocą różnych technik uprawy roli. Największą emisję stwierdzono w kukurydzy uprawianej w zmianowaniu w systemie uprawy płużnej ze zbiorem słomy, co można bezpośrednio wiązać z większym zużyciem oleju napędowego oraz azotu wniesionego w oborniku (tab. 18).

Tabela 18

Emisja CO₂ eq/kg nasion z uprawy kukurydzy w SD Baborówko

Emisje (g CO ₂ eq/kg)	Systemy uprawy (warianty)							
	1 ^{*/}		2 ^{*/}		3 ^{*/}		4 ^{*/}	
	2013	2014	2013	2014	2013	2014	2013	2014
Zużycie ON (l/ha)	8,75	9,32	14,27	14,98	18,97	19,14	22,85	24,09
Nawozy N (kg N)	48,97	52,13	47,51	49,89	48,23	48,67	55,44	58,45
Nawozy K ₂ O (kg K ₂ O)	5,70	6,06	5,53	5,80	5,61	5,66	5,31	5,60
Nawozy P ₂ O ₅ (kg P ₂ O ₅)	5,82	6,19	5,64	5,92	5,73	5,78	5,42	5,72
Pestycydy (kg)	2,30	2,26	2,24	2,16	2,27	2,11	2,15	2,09
Emisja polowa N ₂ O (g CO ₂ eq/kg)	99,54	100,74	96,86	98,30	96,53	94,68	113,85	166,44
Emisja z uprawy (g CO ₂ eq/kg)	171,08	176,70	172,05	177,07	177,34	176,05	205,02	212,39
Emisja z uprawy (g CO ₂ eq/kg/MJ bioetanol)	25,95	29,30	26,59	29,29	28,19	29,54	32,01	35,69
Emisja z uprawy minus emisja z wywaru (g CO ₂ eq/kg/MJ bioetanol)	14,17	15,96	14,50	16,00	15,39	16,13	17,50	19,49

1^{*/} monokultura – uprawa bezorkowa i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu,

2^{*/} monokultura – uprawa uproszczona i pozostawienie całej ilości resztek poźniwnych na polu,

3^{*/} monokultura – uprawa płużna i przyorywanie całej ilości resztek poźniwnych,

4^{*/} zmianowanie – uprawa płużna przy zbiorze całej ilości resztek poźniwnych

Źródło: Jarosz i in., 2017 (14)

Emisje z uprawy kukurydzy w pozostałych obiektach były mniejsze, co wynikało głównie z mniejszego poziomu nawożenia azotem (o 30 N/ha) w porównaniu z uprawą kukurydzy w zmianowaniu. Stwierdzono też, że ziarno kukurydzy mogłoby być wykorzystane do produkcji bioetanolu, ponieważ oszacowane emisje z uprawy, po odliczeniu wielkości emisji na produkty uboczne były mniejsze od 20 g CO₂ eq/kg/MJ bioetanolu, co jest wartością standardową w przypadku uprawy kukurydzy.

Inne badania przeprowadzone przez Rutkowską i in. (27) dotyczące emisji N₂O w uprawie kukurydzy wskazują również na istotne różnicowanie tego parametru

w zależności od przyjętego systemu uprawy roli. Z badań tych wynika jednoznacznie, że bezorkowa uprawa roli charakteryzuje się istotnie mniejszą emisją N_2O do atmosfery praktycznie w każdym badanym siedlisku (lokalizacji), co jest zjawiskiem korzystnym z uwagi na bezsporny fakt negatywnego oddziaływania rolnictwa na środowisko przyrodnicze (tab. 19).

Tabela 19

Emisje N_2O ($\mu g\ N-N_2O\ m^2/h$) z gleby w zależności od systemu uprawy roli

Rok	Uprawa roli	Żelazna	Baborówko	Grabów	Czesławice	Średnio
2014	plużna	10,69 ^{b*}	11,13 ^b	14,36 ^b	12,06 ^b	12,06 ^b
	bezorkowa	8,66 ^a	9,26 ^a	8,30 ^a	10,54 ^a	9,19 ^a
2015	plużna	10,43 ^b	9,48 ^a	12,51 ^b	10,78 ^b	10,80 ^b
	bezorkowa	9,18 ^a	9,60 ^a	7,50 ^a	9,22 ^a	8,87 ^a

^{a*}wartości oznaczone tymi samymi literami nie różnią się istotnie

Źródło: Rutkowska i in., 2017 (27)

Dotychczas brak jest bezpośrednich metod ograniczania emisji N_2O z rolnictwa. Wydaje się, że emisje te można jednak pośrednio ograniczyć poprzez:

- utrzymywanie możliwie małego stężenia azotu mineralnego w glebie (podział dawek N, uprawa międzyplonów);
- precyzyjne metody ustalania dawek nawozów azotowych – testy glebowe i roślinne, rolnictwo precyzyjne (mapy plonów);
- ograniczanie rozpraszania azotu do środowiska (wymywanie, straty gazowe);
- ulepszone techniki (doglebowe) aplikacji nawozów mineralnych, szczególnie naturalnych;
- poprawną gospodarką glebową materią organiczną.

Podsumowanie

We współczesnym rolnictwie uprawa roli, obok oddziaływania na wielkość i stabilność plonów, powinna stwarzać także warunki do wzrostu lub utrzymania na odpowiednim poziomie żyzności gleby oraz ograniczać ujemne oddziaływanie rolnictwa na środowisko przyrodnicze. Powinna być preferowana konserwująca uprawa roli, polegająca na stosowaniu uprawy bezorkowej z mulczowaniem powierzchni gleby resztkami poźniwnymi i międzyplonami. Pozostawienie resztek pozbiorowych roślin na powierzchni pola przyczynia się do zmniejszenia spływów powierzchniowych i zwiększa retencję wodną gleby. Zmniejszenie intensywności uprawy powoduje spowolnienie procesu rozkładu glebowej materii organicznej oraz ograniczenie wydzielania CO_2 i N_2O do atmosfery, co ogranicza efekt cieplarniany.

Istnieje pilna potrzeba wdrożenia do szerokiej praktyki rolniczej uzyskanych dotychczas wyników badań naukowych oraz prac badawczo-rozwojowych nad produkcyjno-ekonomicznymi i środowiskowymi konsekwencjami uproszczeń w uprawie roli. Proponowane rozwiązania charakteryzują się bowiem wieloma

zaletami. Ograniczenie liczby, głębokości i intensywności wykonywania zabiegów uprawowych powoduje istotne zmniejszenie jednostkowych kosztów produkcji (mniejsze zużycie paliwa i nakłady robocizny), jak również może prowadzić do eliminowania procesów degradacji gleby, poprawiać biologiczną aktywność i sprzyjać gromadzeniu próchnicy w glebie.

Należy zaznaczyć, że gospodarstwa rolne bazujące na posiadanym aktualnie sprzęcie nie mogą wprowadzać drastycznych zmian w późniejszym i przedsięwziętym przygotowaniu pola pod zasiew, ponieważ mogą one prowadzić do znacznego wzrostu zachwaszczenia roślin uprawnych, głównie chwastami wieloletnimi. Wskazana jest tu także odpowiednia wiedza fachowa samych rolników, ponieważ wszelkie zaniedbania dotyczące stosowania uproszczeń w uprawie roli prowadzą do drastycznej obniżki plonów i pogorszenia się ekonomicznej opłacalności produkcji.

Wydaje się, że w wyniku zastosowania na szerszą skalę optymalnych rozwiązań technologicznych w zakresie uprawy roli, szczególnie w dużych, specjalistycznych gospodarstwach towarowych, wyróżniających się na tle innych zastosowaniem wszelkich innowacji, rolnictwo w Polsce może w znacznym stopniu przyczynić się zarówno do ochrony rolniczej przestrzeni produkcyjnej, jak również ograniczyć niekorzystne oddziaływanie zmian klimatu na środowisko przyrodnicze i produkcję rolniczą.

Literatura

1. Biskupski A., Pabin J., Kukuła S., Włodek S., Kaus A.: Wpływ ugniatającego oddziaływania elementów jezdnych na właściwości fizyczne gleby oraz plonowanie jęczmienia jarego. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 1998, **460**: 405-412.
2. Biskupski A., Włodek S., Pabin J.: Sposoby uprawy roli a plonowanie i zmiany wilgotności gleby. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol., 2003, **493**: 335-343.
3. Bleharczyk A., Małecka I., Sierpowski J.: Wpływ wieloletniego oddziaływania systemów uprawy roli na fizyko-chemiczne właściwości gleby. *Fragm. Aron.*, 2007, **1(93)**: 7-13.
4. Czyż E., Dexter A.R., Włodek S., Biskupski A., Niedźwiecki J.: Ocena wybranych fizycznych właściwości gleby w różnych systemach uprawy roli. W: *Produkcyjne i siedliskowe skutki stosowania różnych systemów uprawy roli. Raport z tematu badawczego nr 2.3.2, IUNG-PIB Puławy*, 2010: 8-21.
5. Davidson E. A., Acerman I.L.: Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils. *Biogeochemistry*, 1993, **20**: 161-193.
6. Dzienia S., Piskier T., Wereszczaka J.: Wpływ uproszczonych sposobów uprawy gleby na nakłady energetyczne i plonowanie pszenżyta ozimego. Zesz. Nauk. AR Szczecin, 162, *Agricult.* 1994, **58**: 45-48.
7. Dzienia S., Zimny L., Weber R.: Najnowsze kierunki w uprawie roli i technice siewu. *Fragm. Agron.*, 2006, **2**: 227-241.
8. Friedrich Th., Kienzle J., Eppelein J., Basch G.: *Schonende Bodenbearbeitung*, Verlag DLG; Konservierende Bodenbearbeitung, 2008: 55-77.
9. Garcia-Torres L.: *Konservierende Bodenbearbeitung in Europa: Umweltrelevante, ökonomische und EU politische Perspektiven*. Deutsche Gesellschaft für Konservierende Bodenbearbeitung, Berlin, 1999: 5-23.
10. Gonet Z.: Metoda i niektóre wyniki badań energochłonności systemów uprawy roli. *Fragm. Agron.*, 1991, **2**: 7-18.

11. Jacobs A., Rauber R., Ludwig B.: Impact of reduced tillage on carbon and nitrogen storage of two haplic luvisols after 40 years. *Soil and Tillage Research*, 2009, **102**(1): 158-164.
12. Jankowiak J., Małeczka I.: Uproszczenia uprawowe w zrównoważonym rozwoju rolnictwa. W: *Z badań nad rolnictwem społecznie zrównoważonym* (6). IERiGŻ-PIB Warszawa 2008, **102**: 87-113.
13. Jaskulski D., Jaskulska I., Janiak A., Boczkowski T.: Changes in some soil properties under the effect of diversified tillage for maize depending on the forecrop. *Acta Sci. Pol. Agric.*, 2015, **14**(3): 61-71.
14. Jarosz Z., Książak J., Faber A.: Ocena wielkości emisji gazów cieplarnianych systemów uprawy stosowanych w kukurydzy wykorzystywanej do produkcji bioetanolu. *Rocz. Nauk. SERiA*, 2017, **XIX** (1): 60-65.
15. Kinsella J.: The effect of various tillage systems in soil compaction. *Farming for a Better Environment*, A White Paper, Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa, USA, 1995: 15-17.
16. Kozicz J.: Wpływ ugniatającego działania kół w różnym stopniu obciążonego ciągnika na właściwości fizyczne gleby oraz na wzrost, rozwój i plon niektórych roślin uprawnych. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1971, **112**: 67-75.
17. Köller K., Linke Ch.: *Erfolgreicher Ackerbau ohne Pflug*, 2001: 5-176.
18. Krasowicz S., Madej A.: Ocena efektywności energetycznej różnych technik uprawy roli pod pszenicę ozimą. W: *Produkcyjne i siedliskowe skutki stosowania różnych systemów uprawy roli*. Raport z tematu badawczego nr 2.3.2, IUNG-PIB Puławy 2010b: 153-157.
19. Lascala N., Bolonhezi D., Pereira G.T.: Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 2006, **91**(1-2): 244-248.
20. Lenart S., Sławiński P.: Wybrane właściwości gleby oraz występowanie dżdżownic w warunkach siewu bezpośredniego i płużnej uprawy roli. *Fragm. Agron.*, 2010, **4**: 86-93.
21. Lepiarczyk A., Łabza T., Pużyńska K.: Produkcyjność pszenicy ozimej odmiany Turnia i Rysa wysiewanej w siewie czystym i mieszanym w zależności od system uprawy roli. *Annales UMCS, Sec. E*, 2010, **65**(3): 42-50.
22. Małeczka I., Swędrzyńska D., Blecharczyk A., Dytman-Hagedorn M.: Wpływ systemów uprawy roli pod groch na właściwości fizyczne, chemiczne i biologiczne gleby. *Fragm. Agron.*, 2012, **29**(4): 106-116.
23. Orzech K., Marks M., Nowicki J.: Energetyczna ocena trzech sposobów uprawy roli na glebie średniej. *Annales UMCS, Sec. E*, 2004, **59**(3): 1275-1281.
24. Pabin J., Kukuła S., Włodek S., Biskupski A., Kaus A.: Wpływ głęboszowania i ugniataania gleby przejazdami ciągników na jej właściwości fizyczne i plony korzeni buraka cukrowego, *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 1998, **460**: 395-403.
25. Phillips P.P., Phillips S.H.: *No-Tillage Agriculture – Principles and Practice*. Van Nostrand Reinhold Company. New York, Toronto 1984, ss. 306.
26. Rasmussen K. J.: Impact of ploughless soil tillage on yield and quality. *Acta Scandinavian review. Soil Till. Res.*, 1999, **53**(1): 3-14.
27. Rutkowska B., Szulc W., Szara E., Skowrońska M., Jadczyzyn T.: Soil N₂O emission under conventional and reduced tillage methods and maize cultivation. *Plant Soil Environ.*, 2017, **63**(8): 342-347.
28. Schillinger W.F.: Minimum and delayed conservation tillage for wheat – fallow farming. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 2001, **65**: 1203-1209.
29. Schmidt W., Doll D., Nitzsche O.: Erfahrungen mit konservierender Bodenbearbeitung in Sachsen. *Neue Landwirtschaft*, 1999, **5**: 2-5.
30. Smith P., Powlson D.S., Glendinning W., Smith J.U.: Preliminary estimates of the potential for carbon mitigation in European soils through no-till forming. *Global Change Biology*, 1998, **4**(6): 679-685.
31. Smagacz J.: Produkcyjno-ekonomiczne i środowiskowe skutki różnych systemów uprawy roli. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2012, **29**(3): 121-134.

-
32. S m a g a c z J.: Uprawa roli jako element zrównoważenia środowiskowego produkcji roślinnej. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2015, **43(17)**: 89-101.
 33. S m a g a c z J.: Konsekwencje organizacyjne i środowiskowe różnych systemów uprawy roli. Studia i Raporty IUNG-PIB, 2016, **47(1)**: 139-153.
 34. W e b e r R.: Wpływ uprawy zachowawczej na ochronę środowiska. Post. Nauk Rol., 2002, **1**: 57-67.
 35. W e b e r R.: Przydatność uprawy konserwującej w rolnictwie zrównoważonym. Monografie i Rozprawy Naukowe, IUNG-PIB, 2010, **25**: 1-72.
 36. W e y e r T.: Schonende Bodenbearbeitung. In: Konservierende Bodenbearbeitung – Verdichtung, Verlag DLG 2008: 30-44.
-

Adres do korespondencji:

dr hab. Janusz Smagacz, prof. IUNG-PIB
Zakład Systemów i Ekonomiki Produkcji Roślinnej
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel.: 81 47 86 804
e-mail: smagacz@iung.pulawy.pl

AUTOR

Janusz Smagacz

ORCID

0000-0003-4322-3178