

STUDIA I RAPORTY IUNG-PIB

ZESZYT 59(13): 77-91

2019

Dorota Pikula*Institut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa - Państwowy Instytut Badawczy
w Puławach*

PRAKTYKI ZAPOBIEGAJĄCE STRATOM WĘGLA ORGANICZNEGO Z GLEBY*

Słowa kluczowe: sekwestracja węgla organicznego, glebowa materia organiczna, płodozmian, rozpuszczalna forma węgla, mineralizacja

Wstęp

Ochrona gleb jest tematem międzynarodowych konwencji ochrony środowiska w ramach Agendy 21 ONZ, których celem jest zrównoważone użytkowanie ziemi oraz jej ochrona przed degradacją i zanieczyszczeniem. Szczególne miejsce wśród 8 głównych zagrożeń wymienionych w strategii ochrony gleb zajmuje spadek zawartości materii organicznej (17). Zawartość glebowej materii organicznej stanowi integracyjny i najczęściej wymieniany wskaźnik jakości gleby (5, 8, 22, 25, 28) dlatego też zachowanie i przeciwdziałanie jej ubytkom jest ważne z punktu widzenia limitowania plonów roślin uprawnych. Według prognoz Międzyrządowego Zespołu ds. Zmian Klimatu (13) globalnie możliwa sekwestracja węgla w glebach użytkowanych rolniczo szacowana jest na 0,3 t C·ha⁻¹, a na użytkach zielonych 0,5-0,7 t C ha⁻¹ rocznie. Utrzymanie, a najlepiej systematyczny wzrost zawartości materii organicznej, staje się niezwykle ważne nie tylko w kontekście ochrony gleb, ale też jako znaczącego rezerwuaru węgla organicznego. Zasoby materii organicznej w ekosystemach nie są stałe i ulegają wahaniom. Determinowane są przez dwa główne czynniki: dopływ świeżego materiału organicznego w określonym odcinku czasu „t” i intensywności mineralizacji, definiowanej jako część dopływu, która ulega rozkładowi w czasie „t” i zwana jest współczynnikiem mineralizacji „k” (8). W zależności od warunków siedliskowych i rodzaju świeżej masy organicznej trafiającej do gleby, mineralizacji ulega aż od 40 do 70% materii organicznej w pierwszym roku. W kolejnych latach w glebie pozostają materiały organiczne

* Opracowanie wykonano w ramach zadania 2.2 w programie wieloletnim IUNG-PIB.

trudniej rozkładane przez mikroorganizmy i tempo mineralizacji maleje na rzecz humifikacji (1, 8, 16). Istotnym czynnikiem regulującym intensywność procesu mineralizacji jest klimat. Najsilniej na ten proces oddziałuje temperatura i wilgotność (2). Każdy wzrost temperatury wiąże się ze zwiększeniem ewaporacji i zwiększeniem się deficytu wodnego, co wskazuje na zmniejszenie zawartości węgla w glebie (12, 15). Berg już w 1984 roku stwierdził, że 85% ubytków masy organicznej w procesie mineralizacji spowodowane jest zmianami klimatu (2). Niska wilgotność gleby spowalnia proces mineralizacji, gdyż w warunkach braku wody aktywność mikroorganizmów spada. W naszych warunkach klimatycznych występujące susze mogą więc ograniczać tempo mineralizacji. Mimo, iż w ostatnich 30 latach w dużej części gleb lekkich stwierdza się wzrost zawartości węgla organicznego (9), to wciąż bilans materii organicznej w wielu województwach jest niekorzystny, głównie ze względu na brak obornika i innych nawozów naturalnych (19, 20). Z badań naukowych wynika, że zwiększenie zawartości węgla organicznego w glebach będących w użytkowaniu ornym, szczególnie lekkich, jest długotrwałe i trudne (20, 25, 29). Gleby orne, w porównaniu do gleb leśnych i łąkowych, zawierają bowiem mniej węgla organicznego, ponieważ praktykowany powszechnie system uprawy płuźnej powoduje większe straty węgla organicznego (8, 30). Ponadto w glebach lekkich i bardzo lekkich zdolności akumulacji węgla organicznego są ograniczone ze względu na mniejszy kompleks sorpcyjny w stosunku do gleb cięższych. Nawet przy stałym dopływie zewnętrznej materii organicznej do gleby lekkiej, na gruntach ornych procesy rozkładu i akumulacji nie będą przebiegać jednakowo. W miarę upływu czasu rosną nie tylko zasoby, ale straty, gdyż proporcjonalnie rośnie również ilość materii organicznej, która corocznie ulega rozkładowi. Istnieje wiele metod zwiększających akumulację węgla organicznego w glebie. Do najpowszechniejszych należy zaliczyć: uprawę zerową, uproszczoną, stosowanie nawozów naturalnych i organicznych, uprawę roślin w międzyplonie i głęboko korzeniących się oraz zróżnicowany płodozmian (7, 14, 20, 24, 25, 30, 32). Wprowadzenie do gleby kompostów, torfu oraz węgla brunatnego, jest także zabiegiem prowadzącym do zwiększenia w nich zawartości węgla organicznego (21).

Celem pracy jest przedstawienie dotychczasowej wiedzy na temat praktycznych metod zapobiegania stratom węgla organicznego i zwiększenia jego sekwestracji w glebach.

Możliwości zwiększenia zawartości węgla organicznego w glebie

Możliwości produkcyjne gleb w Polsce ogranicza przewaga gleb lekkich (35%) i bardzo lekkich (30%), a więc słabo próchnicznych, charakteryzujących się często odczynem bardzo kwaśnym i kwaśnym, który wpływa niekorzystnie na ich żyzność (27). W przypadku gleb lekkich, żyzność i urodzajność można zachować, odtwarzać, a nawet powiększać poprzez stosowanie nawozów naturalnych, organicznych i mineralnych (3, 4, 20, 25, 28). Lal (23) wyróżnia trzy kierunki możliwości

zwiększenia zawartości węgla organicznego w glebie. Pierwszy to ograniczenie erozji – poprzez stosowanie mulczowania gleby i racjonalnej gospodarki pastwiskowej oraz ograniczenie mineralizacji materii organicznej (uprawa roślin pozostawiających w glebie resztki trudniej rozkładające się, zachowanie gruzełkowatej struktury gleby). Drugim kierunkiem działań są wszelkie zabiegi skutkujące zwrotem węgla do gleby (stosowanie nawozów organicznych i naturalnych, uprawa międzyplonów, poprawienie gospodarowania wodą). Ostatni etap obejmuje zwiększenie zawartości węgla w plonach roślin uprawnych poprzez intensyfikację produkcji.

W Polsce jedynym i praktykowanym instrumentem mającym na celu przeciwdziałanie stratom węgla organicznego z gleby są programy rolnośrodowiskowe, w których rolnicy w zamian za poprawę bilansu materii organicznej w gospodarstwie otrzymują wsparcie finansowe na uprawę międzyplonów. Jednak nie zawsze te działania równoważą straty węgla w wyniku mineralizacji i uprawy roślin. W latach 80. XX w. stosowany powszechnie obornik rekompensował ubytki materii organicznej z gleb. Jak podają Krasowicz i Kuś (19), od początku lat 90. XX w. drastyczne spadło pogłowie zwierząt. Spowodowało to zmniejszenie, a w niektórych województwach deficyt obornika, w związku z tym pojawił się problem ubytku zawartości węgla organicznego w glebie. Ubytek materii organicznej jest ważnym wskaźnikiem pogorszenia warunków siedliskowych oraz żyzności gleby. Obecnie możliwości zwiększenia akumulacji węgla organicznego można poszukiwać zarówno w obszarze zalesień i trwałych użytków zielonych, jak i gruntów ornych (5, 6, 10, 29, 34). Badania dowodzą, że wprowadzenie do uprawy roślin powalających na zwiększenie ich biomasy roślin umożliwia pozostawienie większej ilości korzeni i resztek pozbiorowych, co wpływa korzystnie na akumulację węgla organicznego (16, 18, 25). Badania wskazują również na pozytywną rolę przyorywania słomy w glebie, zarówno w uprawach monokulturowych, jak i płodozmianowych (14, 30, 36). Podobną rolę pełni utrzymywanie na glebie okrywy roślinnej, zachowanie gruzełkowatej struktury gleby oraz optymalne gospodarowanie wodą (24, 31, 32). Najwięcej węgla organicznego pozwala zgromadzić użytkowanie leśne gleb, czyli zamiany gruntów ornych na nierolne. Oszacowano, że sekwestracja węgla w glebach leśnych zależy od siedliska i oraz typu drzewostanu i wynosi od $75 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ C}$ w glebach słabych siedlisk borowych, do ponad $120 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ C}$ w siedliskach lasowych, a największą akumulację spotyka się w grupach troficznych siedlisk wilgotnych (12, 34). Odrębną kategorię stanowią siedliska mokre i bagienne: akumulacja węgla w glebach tych siedlisk wynosi od 500 do ponad $900 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$. W praktyce rolniczej zamiana użytkowania ornego na leśny jest jednak niemożliwa do wprowadzenia na dużą skalę. Z tego powodu wdraża się dostępne praktyki wymienione powyżej.

Przemiany węgla organicznego w glebie

Węgiel organiczny (Corg.) występuje w glebie w postaci substancji humusowych, które są odporne na rozkład, czyli próchnicy oraz substancji niehumusowych – tłuszczowców, węglowodanów i ligniny, z których w wyniku humifikacji tworzy się w efekcie próchnica. Związki węgla oraz ich połączenia organiczno - mineralne mogą występować w formie nierozpuszczalnej (Corg.) oraz rozpuszczalnej (RWO), dlatego sposób użytkowania gruntów może skutkować jego zachowaniem lub utratą (5, 6, 8). O zawartości materii organicznej w glebie decydują czynniki środowiskowe i stopień nasilenia antropopresji, np. wszystkie zabiegi, które zwiększają dopływ powietrza do gleby zwiększają wzrost jej temperatury, co przyspiesza mineralizację i w efekcie powoduje straty węgla organicznego z gleby (12, 14, 20, 22). W procesie mineralizacji świeżo wprowadzonej masy organicznej, węgiel organiczny w warunkach tlenowych ulega reakcji utlenienia i powstaje jego forma gazowa, która podlega emisji do atmosfery (28). Straty Corg. następują więc w wyniku tego procesu - to emisje gazowe CO₂ i CH₄ oraz wymywania do wody formy rozpuszczalnej węgla (RWO) do wód gruntowych (5, 29). Rozpuszczalna forma węgla jest częścią jednej z najbardziej mobilnych i najszybciej rozkładającej się frakcji glebowej materii organicznej czyli rozpuszczalnej materii organicznej RMO (5). Mimo iż stanowi jej niewielki procent, to odgrywa znaczącą rolę w środowisku, gdyż zwiększa straty węgla z gleby. Rozpuszczalne frakcje materii organicznej mogą być bowiem wymywane i wpływać niekorzystnie na jakość wód powierzchniowych i podziemnych. Burzyńska (6) donosi, że duża zawartość materii organicznej w glebach łąkowych przyczynia się do powstawania RWO, co stwarza ryzyko jego wymywania wraz ze składnikami mineralnymi do wód gruntowych. Wykazała ona współzależności między zawartością w glebie formy rozpuszczalnej węgla, a stężeniem fosforu, potasu, magnezu i manganu w wodach gruntowych pobranych z gospodarstw demonstracyjnych w ramach Projektu Ograniczania Zanieczyszczeń Bałtyku ze Źródeł Rolniczych (BAAP); (5).

Jurcova i Bielek (16) podają, że czynnikiem, który decyduje o nasileniu procesów mineralizacji w danej glebie jest jej potencjał produkcyjny. Intensywność tego procesu jest większa na glebach słabszych, o tzw. niższym potencjale produkcyjnym. W zależności od potencjału produkcyjnego danej gleby, autorzy oszacowali następująco straty węgla organicznego. Do I kategorii, w której roczne straty węgla wynoszą 2,81 t·ha⁻¹ zaliczają gleby charakteryzujące się wysokim potencjałem produkcyjnym. Odpowiednio II i III kategorię stanowią gleby, w których roczne straty węgla wynoszą 4,27 i 4,49 t·ha⁻¹. Podane średnie roczne straty tego składnika mogą być modyfikowane gatunkiem uprawianej rośliny.

Przeciwnym do mineralizacji procesem jest humifikacja. Wyróżnia się dwa jej typy: humifikację abiotyczną i biochemiczną (1). Pierwsza zachodzi gdy aktywność biologiczna środowiska glebowego jest niska i efektem syntezy związków chemicznych są kwasy fulwowe i szare kwasy huminowe. Humifikacja biochemiczna zachodzi na glebach z dużym dopływem resztek roślinnych oraz jest uzależniona od ilościowego

i jakościowego składu mikrobiologicznego gleby (1, 16, 25). Humifikacja prowadzi do nagromadzenia w glebie specyficznych związków organicznych zwanych substancjami humusowymi. Charakterystyczną cechą tych związków jest podwyższona ich stabilność w środowisku glebowym. Przemiana materii organicznej w glebie w trwałą humus uzależniona jest jednak od właściwości fizycznych i chemicznych gleby, aktywności mikroorganizmów glebowych oraz gatunku gleby. Dostarczona do gleby świeża materia organiczna – zawierająca cukry, skrobię, białka proste i złożone, hemicelulozę, celulozę, ligniny, tłuszcze oraz woski – jest rozkładana równocześnie. Tempo rozkładu jej substratów uzależnione jest od ich budowy chemicznej (8).

Aby zinterpretować wahania zawartości węgla w różnych warunkach klimatycznych, glebowych i przy zróżnicowanych sposobach użytkowania, wykorzystuje się często model RothC (10, 15). Obejmuje on pięć składowych (związków węgla) tworzących pulę węgla organicznego w warstwie powierzchniowej gleby. Każdy komponent wykazuje inną podatność na rozkład pod wpływem oddziaływania warunków meteorologicznych i mikroorganizmów glebowych. Od łatwo rozkładających się składników deponowanych w wyniku uprawy roślin (tj. ściółka i resztki poźniwne, w tym korzenie roślin, które rozkładają się w ciągu około 36 dni), przez trudno rozkładające się części składowe (około 3,3 roku), do bardzo trwałych związków humusowych, wymagających czasu do rozkładu szacowanego na ponad 50 lat, oraz inertej materii organicznej, która rozkłada się nawet 50 tys. lat. W uprawach roślin rolniczych blisko 60% tworzą składniki łatwo rozkładające się, w lasach jest to zaledwie 20% masy ściółki.

O akumulacji węgla organicznego w glebie decyduje także temperatura powietrza i wilgotność gleby. Każdy wzrost temperatury wiąże się ze zwiększeniem ewaporacji i deficytu wodnego, co zgodnie z modelem RothC wskazuje na zmniejszenie zawartości węgla w glebie. Tę zależność potwierdzono w badaniach prowadzonych w Polsce w województwach podlaskim i dolnośląskim. W gruntach ornych tych województw odnotowano statystycznie istotne zmniejszenie się puli węgla (10). W tym samym czasie zaobserwowano także podniesienie się średniej rocznej temperatury w stosunku do obserwowanej w poprzednich wieloletniach.

Przyorywanie słomy

W gospodarstwach bezinwentarzowych lub charakteryzujących się małą obsadą zwierząt, jednym ze sposobów zwiększenia zawartości węgla organicznego w glebach jest przyorywanie słomy (20, 36). Słomę w uprawie roślin stosowano już w końcu XIX i początku XX wieku. Nawożenie słomą szersze zainteresowanie zyskało po akcesji Polski do UE, gdyż w wyniku zmiany żywienia zwierząt i budowy pomieszczeń bezściółowych zaczęły powstawać jej nadwyżki. Wpływ długotrwałego stosowania słomy na tworzenie się próchnicy nie jest do końca poznany. Przy rozkładzie substancji organicznej w glebie istotny jest stosunek

celulozy do ligniny. Przy stosunku obu tych substratów w oborniku 1,2:1,8 pozostaje zatem więcej węgla w glebie (o 10 do 15%) niż z substancji organicznej o stosunku >2, który jest w słomie. Wartość reprodukcyjną słomy określa się przy wykorzystaniu współczynników reprodukcji/odnowy, które informują o ilości (w $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) glebowej materii organicznej, o którą zostanie wzbogacona gleba w wyniku wprowadzania do niej słomy określonego gatunku roślin (18). Zgodnie ze stosowanymi w Polsce współczynnikami reprodukcji i degradacji materii organicznej, współczynnik odnowy materii organicznej dla 1 tony masy słomy wynosi średnio +0,175–0,210. Dla porównania – dla 1 tony obornika wynosi +0,070, a dla 1 m^3 gnojowicy +0,014–0,028 (28). Natomiast według współczynników rekomendowanych przez VDLUFA (18), współczynnik odnowy dla słomy wynosi 100 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ nawozu. W 5 t suchej masy słomy znajduje się przeciętnie około 4,8 t materii organicznej, w tym 3,1 t substancji organicznej, porównywalnej pod względem oddziaływania na odnowę puli próchnicy w glebie podobnej do substancji organicznej obornika. Większość badań naukowych potwierdza, że nawożenie słomą powoduje wzrost materii organicznej w glebie lub wskazuje na jej rolę w stabilizacji zawartości węgla organicznego w glebie (20, 30, 36). Smagacz (30) potwierdza w swoich badaniach, że przyorywanie słomy zwiększało w warstwie ornej gleby zawartość próchnicy i przyswajalnych składników pokarmowych. Wyższe wartości tych wskaźników po 4 latach badań stwierdzono w obiekcie, gdzie słomę przyorywano corocznie, bez dodatkowej dawki azotu poprawiającej stosunek C:N w przyorywanej słomie. Pomimo pozytywnego oddziaływania słomy na zawartość próchnicy w glebie panuje jednak przekonanie, że przyorana słoma może również zmniejszać plony roślin w pierwszym roku po przyoraniu. W latach 30. XX w. tę zależność tłumaczono tym, że po przyoraniu słomy bardzo szybko namnażają się drobnoustroje, które do budowy własnego ciała pobierają znaczne ilości azotu mineralnego z gleby. Rozwój bakterii po przyoraniu słomy jest tym intensywniejszy, im szerszy jest stosunek C:N w słomie i im większa masa słomy zostanie przyorana. Z tego powodu, jak już wcześniej wspomniano, rekomendowane jest stosowanie razem ze słomą określonej ilości azotu mineralnego (20). Najczęściej w praktyce rekomendowana jest dawka 8 kg azotu na tonę przyoranej słomy. Według Kusia i Madeja (20) roczna produkcja słomy zbóż, rzepaku i kukurydzy wynosi około 30 mln ton. Ilość słomy koniecznej do zrównoważenia bilansu materii organicznej szacuje się na 1/3 całkowitej produkcji. Na cele nawozowe ze względów fitosanitarnych w pierwszej kolejności powinna być przeznaczana słoma rzepaku, a następnie kukurydzy uprawianej na ziarno lub kiszonkę. Zdaniem autorów szacujących przeznaczenie słomy na przyoranie, jej tak duża ilość spowodowana jest małą produkcją obornika (20). Warto podkreślić jest to, że słoma rozkłada się długo w glebie, a występujące częste susze w okresie późniwym stanowią duże ograniczenie w jej przyorywaniu. Według Zielińskiego i Ziętary (36) przeznaczenie nadwyżek słomy na przyoranie daje możliwość poprawy potencjału plonotwórczego polskich gleb, których przeciętna jakość należy do najniższych w UE. W Polsce ponad 3,7 mln ha potencjalnej powierzchni użytków rolnych posiada przeciętny wskaźnik

Waloryzacji Rolniczej Przestrzeni Produkcyjnej (WWRPP) na poziomie niższym niż 52 pkt. (na 120 pkt. możliwych do osiągnięcia). Oznacza to, że w naszym kraju istnieje znaczący obszar UR o szczególnie niekorzystnych warunkach gospodarowania – gleby w niskiej kulturze. Autorzy ci uważają, że przyoranie nadwyżki słomy pozwoli w ciągu roku dodatkowo zakumulować 1034,6 tys. ton CO₂.

Stosowanie uproszczonej uprawy i siewu bezpośredniego

Uprawa roli, oprócz nawożenia, jest podstawowym elementem agrotechniki kształtującym właściwości gleby (4, 24, 33). Pod wpływem jej odwracania, spulchniania, mieszania, zagęszczania, kruszenia w pierwszym momencie następuje zmiana właściwości fizycznych, głównie stosunków powietrzno-wodnych, gęstości objętościowej, zwięzłości. W konsekwencji zmianie ulegają także właściwości chemiczne i biologiczne gleby (25). Gdy 15-30% materiału roślinnego pozostaje na powierzchni pola, uprawę nazywa się uproszczoną lub zredukowaną, a gdy ponad 30% – uprawą konserwującą (14). Na polach uprawianych pasowo pozostaje około 50% resztek roślinnych, a stosując siew bezpośredni – ponad 90%. Materiał roślinny pełni nie tylko rolę mulczu fizycznie chroniącego glebę, ale przede wszystkim jest podstawowym substratem próchnicy. Jego rozkład zależy od warunków glebowych, w jakich on się znajduje, a następnie powstawanie trwałej próchnicy. W systemie uproszczonej uprawy roli w warstwie gleby od 0 do 10 cm stwierdza się większą zawartość węgla organicznego w porównaniu do uprawy płużnej (Tab.1 i 2); (4, 26). Zgodnie z badaniami Bleharczyka i in. (4), siew bezpośredni pozwala na największą akumulację tego składnika w glebie. Płużna uprawa roli prowadzi do strat węgla organicznego w glebie.

Tabela 1
Zawartość węgla organicznego w glebie (g·kg⁻¹) w zależności od systemu uprawy roli

Warstwa gleby (cm)	Uprawa roli				
	Płużna, klasyczna	Uproszczona			Siew bezpośredni
		Płytki orka	Brona talerzowa	Agregat ścierniskowy	
0-5	8,5	8,9	10,1	9,8	10,4
10-20	8,9	7,8	7,9	7,4	6,8

Źródło: Bleharczyk i in., 2007 (4)

Tabela 2

Chemiczne właściwości gleby w zależności od systemów uprawy roli

Parametr	System uprawy roli	Warstwa gleby (cm)	
		0-10	10-20
pH- 1M KCl	TR*	0,69	6,71
	UPR	6,28	6,73
	SB	6,23	6,74
	NIR _{0,05} - LSD _{0,05}	0,37	r.n.
Corg.	TR*	9,08	9,01
	UPR	11,84	8,97
	SB	12,47	8,83
	NIR _{0,05} - LSD _{0,05}	0,62	r.n.
N ogólny	TR*	0,98	0,97
	UPR	1,19	0,94
	SB	1,25	0,91
	NIR _{0,05} - LSD _{0,05}	0,12	r.n.
C/N	TR*	9,3	9,3
	UPR	9,9	9,5
	SB	10,0	9,7
	NIR _{0,05} - LSD _{0,05}	0,31	r.n.
P g·kg ⁻¹	TR*	215	202
	UPR	203	215
	SB	210	207
	NIR _{0,05} - LSD _{0,05}	r.n.	r.n.
K g·kg ⁻¹	TR*	166	176
	UPR	237	159
	SB	297	161
	NIR _{0,05} - LSD _{0,05}	21,0	13,2
Mg g·kg ⁻¹	TR*	40,2	39,8
	UPR	49,9	30,2
	SB	53,5	29,7
	NIR _{0,05} - LSD _{0,05}	5,1	3,9

TR*- tradycyjny system uprawy, UPR - uproszczony, SB- siew bezpośredni, r.n różnica nieistotna

Źródło: Małecka i in., 2019 (26)

W związku z wdrażaniem praktyk zmniejszających mineralizację materii organicznej w glebie, pewną alternatywą dla uprawy płużnej jest zatem stosowanie uproszczonej uprawy roli i siewu bezpośredniego. Z praktyki wynika, że ten sposób uprawy jest wdrażany w większych gospodarstwach. Uprawa bezorkowa roli ma duże znaczenie nie tylko na akumulację całkowitego węgla organicznego, ale przede wszystkim na trwałe i labilne frakcje próchnicy. Dieckman i Koch (7) donoszą, że bezorkowa uprawa ogranicza proces mineralizacji i zmniejsza straty materii organicznej w warstwie 0-5 cm gleby nawet o 200 kg ha⁻¹·rok⁻¹.

Wpływ płuznej uprawy i siewu bezpośredniego na zawartość materii organicznej badano w wieloletnim doświadczeniu zlokalizowanym w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Chylicach, prowadzonym od 1975 roku (24). Gleba w tym doświadczeniu zaliczana jest wg. FAO do typu Mollic Gleysols. W doświadczeniu badane są dwa systemy uprawy roli: uprawa płuzna i uprawa zerowa. W roku 2009 uprawiano pszenicę ozimą, a w roku 2010 jęczmień jary. W badaniach oceniano jak sposób uprawy gleby (uprawa zerowa, po której następuje siew bezpośredni i uprawa płuzna) wpływa na akumulację frakcji materii organicznej izolowanych z gleby metodami fizycznymi: frakcji shumifikowanej (frakcji o średnicy cząstek <0,05 mm, tworzącej kompleksy mineralne z cząstkami pyłu i łu) i bardzo labilnej frakcji - POM, o średnicy frakcji piasku 2-0,05 mm. Wyniki badań wykazały, że stosowanie ponad 30-letniego siewu bezpośredniego, wpłynęło na akumulację węgla organicznego w warstwie 0-10 cm gleby. Badania przeprowadzone przez różnych autorów wskazują, że jest to dość powszechne zjawisko, gdyż nie występuje mieszanie i obracanie gleby, a materia organiczna zgromadzona w wierzchniej warstwie jest trwalsza, co zapobiega jej stratom (4, 11, 24). Wykazano ponadto, że udział POM (cząstki o średnicy 2-0,05 mm) w ogólnym węglu organicznym gleby istotnie różniły się pomiędzy systemami uprawy; w warstwie 0-10 cm gleby wynosił średnio od 13,1% w uprawie płuznej do 16,9% w siewie bezpośrednim. Podobne wyniki otrzymali West i Post (33). Badając 67 różnych gleb użytkowanych rolniczo stwierdzili, że POM o średnicy cząstek 2-0,05 mm stanowi średnio 19% i maksymalnie może gromadzić 65% glebowego węgla. Interesujących wyników badań dostarczyły badania przeprowadzone w RZD w Chylicach. Dotyczyły one spowolnienia tempa obiegu węgla glebowego i poprawy stabilności agregatów w warunkach siewu bezpośredniego, co może również wpływać na stopniowe gromadzenie materii organicznej we frakcji bardziej zhumifikowanej i stabilnej. Badania potwierdziły, że labilna frakcja POM jest bardziej podatna na zmiany pod wpływem uprawy płuznej i siewu bezpośredniego niż frakcja shumifikowana i ogólna zawartość węgla organicznego w glebie. Główna część glebowego węgla organicznego akumulowała się bowiem we frakcji zhumifikowanej. Stosowanie siewu bezpośredniego zwiększało istotnie labilną frakcję POM w ogólnej puli węgla organicznego w warstwie 0-10 cm. Większa zawartość tej frakcji w glebie pozbawianej uprawy może wynikać, jak podają autorzy, z fizycznej ochrony labilnych cząstek POM wewnątrz stabilnych form agregatów glebowych. Zatem stosowanie siewu bezpośredniego może być skutecznym narzędziem prowadzącym do sekwestracji węgla organicznego w glebach użytkowanych rolniczo (33).

Uprawa roślin w zmianowaniu, stosowanie międzyplonów oraz zwiększanie bioróżnorodności

Zgodnie z wartościami współczynników reprodukcji i degradacji materii organicznej, uprawa określonych gatunków roślin może powodować straty lub akumulację materii organicznej (18, 25, 28). Uprawa roślin jednorocznych w szerokich rzędach przyspiesza proces mineralizacji. Natomiast zwarta pokrywa roślinna zwiększa aktywność biologiczną gleby, dzięki czemu przyczynia się do tworzenia związków próchnicznych i stabilizacji struktury gleby. Z tego powodu uprawa roślin bobowatych i traw oraz ich mieszanek sprzyjają akumulacji węgla organicznego w glebie. Możliwości sekwestracji węgla organicznego w glebie lekkiej badano w wieloletnim doświadczeniu założonym w 1979 roku w Rolniczym Zakładzie Doświadczalnym w Grabowie (25). Eksperyment obejmuje dwa czteropolowe zmianowania i prowadzony jest polami dwóch roślin w każdym sezonie wegetacyjnym. W zmianowaniu A, określonym jako „zubożające” glebę w materię organiczną, uprawiane są: kukurydza na ziarno (do 2007 r. ziemniak), pszenica ozima, jęczmień jary i kukurydza na kiszonkę. W zmianowaniu B, określanym jako „wzbogacające” glebę w materię organiczną, uprawia się: kukurydzę na ziarno (do 2007 r. ziemniak), pszenicę ozimą + gorczycę na przyoranie jako międzyplon ścierniskowy, jęczmień z wsiewką koniczyny i mieszankę koniczyny z trawami. Przez dwie pierwsze czteroletnie rotacje zmianowań. Drugim, obok zmianowań, czynnikiem doświadczenia, były poziomy nawożenia obornikiem. Nawóz ten stosowano w obu zmianowaniach pod ziemniaki w dawkach 0, 20, 40, 60 i 80 t·ha⁻¹ co 4 lata. Od trzeciej rotacji w doświadczeniu wprowadzono kolejny czynnik, którym jest zróżnicowany poziom nawożenia azotem mineralnym (N₀, N₁, N₂, N₃), dostosowanym do wymagań pokarmowych uprawianych roślin. Dawki N₂ i N₃ są wielokrotnościami dawki N₁, która od 2007 roku w zmianowaniu A wynosi odpowiednio: 50 kg pod kukurydzę na ziarno, 50 kg pod pszenicę ozimą, 30 kg pod jęczmień jary a w zmianowaniu B: 50 kg pod kukurydzę na ziarno, 50 kg pod pszenicę ozimą, 30 kg pod jęczmień jary z wsiewką oraz 50 kg pod każdy pokos mieszanki koniczyny z trawami. Na akumulację materii organicznej w glebie największy wpływ miało zmianowanie, następnie nawożenie obornikiem (25). Wpływ regularnie stosowanego obornika (raz na cztery lata) na zawartość węgla organicznego był ściśle powiązany z dobozem gatunków roślin do uprawy. W zmianowaniu A w skrajnych obiektach doświadczalnych (bez obornika i azotu mineralnego) zawartość węgla organicznego po 33 latach prowadzenia doświadczenia wynosiła 6,1 g Corg.·kg⁻¹ gleby. Największą ilość węgla organicznego (8,5 g·kg⁻¹) stwierdzono w zmianowaniu B, w glebie nawożonej obornikiem i najwyższą dawką azotu mineralnego (25). Korzystny wpływ zmianowania B zapewniały głównie uprawa mieszanki koniczyny z trawami i uprawa międzyplonu ścierniskowego na przyoranie. Po 33 latach stosowania obornika w dawce 20 t·ha⁻¹ w zmianowaniu A nie uzyskano zwiększenia zawartości Corg. w glebie. Wzrost ten o 8,1% nastąpił dopiero po zastosowaniu dawki 40 t·ha⁻¹. W zmianowaniu B z rośliną bobowatą już zastosowanie dawki 20 t·ha⁻¹ obornika powodowało wzrost

o 7,2 % zawartości węgla organicznego w glebie, w porównaniu do obiektu bez tego nawozu. Powyższe wyniki potwierdzają korzystny wpływ współdziałania obornika z odpowiednim doбором gatunków roślin na akumulację węgla organicznego w glebie. W badaniach potwierdzono także wzrost zawartości tego składnika w glebie wraz ze zwiększeniem dawki obornika, był on istotnie większy w glebie pod zmianowaniem B niż w zmianowaniu A (25).

Skuteczną metodą ograniczenia strat Corg. z gleby może być także uprawa międzyplonów. Thomson i Christensen (31) wskazują, że przyorywanie międzyplonów przyczynia się do wzrostu zawartości węgla organicznego w glebie. Wpływ wsiewek międzyplonowych życicy wielokwiatowej i koniczyny czerwonej na zawartość węgla organicznego w glebie badano m.in. w doświadczeniu polowym założonym w 1989 roku w Bałcynach. Doświadczenie zlokalizowane było na glebie średniej (32). Czynnikiem pierwszego rzędu był sposób siewu jęczmienia jarego, tj. w siewie czystym i uprawa z wsiewkami międzyplonowymi życicy wielokwiatowej i koniczyny czerwonej. Drugim czynnikiem było usytuowanie jęczmienia w trzech, czteropolowych płodozmianach: A – 25% (ziemniak-jęczmień jary w siewie czystym lub z wsiewką życicy wielokwiatowej, groch siewny – pszenica jara), B – 50% (ziemniak-jęczmień jary w siewie czystym lub wsiewką koniczyny czerwonej – pszenica jara-jęczmień jary w siewie czystym lub z wsiewką życicy wielokwiatowej) i C-75% (ziemniak - jęczmień jary w siewie czystym lub wsiewką życicy wielokwiatowej-jęczmień jary w siewie czystym lub z wsiewką koniczyny czerwonej - jęczmień jary w siewie czystym lub z wsiewką życicy wielokwiatowej). W doświadczeniu w Bałcynach zawartość węgla zwiększała się po wprowadzeniu do gleby biomasy wsiewek. Po upływie 4 lat nie stwierdzono średnio dla pól płodozmianowych zmian zawartości węgla organicznego w obiektach z siewem czystym jęczmienia. W obiektach z wsiewkami nastąpił wzrost jego zawartości. Wsiewki międzyplonowe życicy wielokwiatowej i koniczyny czerwonej zapobiegały obniżeniu węgla organicznego w stanowiskach po pszenicy jarej i jęczmieniu jarzym (32).

W uprawach roślin w monokulturze zazwyczaj odnotowuje się niższą zawartość węgla organicznego niż w zmianowaniach. W przypadku trwałych użytków zielonych, jak podaje Sapek (29), proces wiązania CO₂, dzięki całorocznemu przykryciu gleby roślinnością, jest wysoki. Szczególnie proces immobilizacji węgla organicznego, czyli ograniczenia jego strat, występuje na glebach łąkowych torfowych, bardzo wilgotnych. Tę tezę potwierdzają badania prowadzone przez Burzyńską (5). Gleby łąkowe, dodatkowo nawadniane, akumulowały więcej węgla organicznego pod wpływem, zarówno nawożenia organicznego, jak mineralnego, w porównaniu do gleb przesuszonych. Łąki prawidłowo nawożone oraz regularnie wapnowane odgrywają zatem bardzo ważną rolę w akumulacji węgla organicznego w glebie. Określane są mianem „pułapek” na CO₂ (29). Trawy pozostawiają w glebie bowiem gęstą sieć korzeni, co zwiększa zawartość węgla organicznego oraz zapobiega suszy glebowej.

Yang i in. (35) wskazują natomiast na dużą rolę zwiększania bioróżnorodności gatunkowej w sekwestracji Corg. w glebie. W ich trwającym 22 lata doświadczeniu, w którym badali wpływ sukcesji roślin trawiastych uprawianych w monokulturze oraz

w mieszankach ze strączkowymi na glebach zdegradowanych, uzyskali wyższe wskaźniki akumulacji węgla w glebie w drugim okresie badań (lata 13–22). Większa produkcja części nadziemnych i biomasy korzeni może bezpośrednio wiązać się z uprawą wielu gatunków roślin, zwłaszcza traw typu C4 i roślin strączkowych. Wytwarzana większa masa korzeni mieszanek wykazuje szybszą tendencję do gromadzenia w glebie węgla, w porównaniu z poletkami, na których uprawiano tylko same trawy. Ponadto badacze ci wskazują, że roczne tempo magazynowania węgla w glebie było zróżnicowane w zależności od czasu uprawy roślin i było o 90% większe w drugim okresie trwania doświadczenia (14–22 lat) niż w pierwszym okresie (1–13 lat). Również w drugim okresie prowadzenia doświadczenia uzyskano o 200% większą akumulację węgla w glebie, związaną z większą sukcesją roślin o największej bioróżnorodności (traw C4 i roślin strączkowych). W przeprowadzonych badaniach, w kombinacjach z roślinami o największej bioróżnorodności akumulowało się ponadto o 178% więcej węgla w glebie niż pod monokulturą traw, co świadczy o potencjalnie dużej przewadze magazynowania węgla, jaką może zapewnić szybkie przywrócenie większej bioróżnorodności roślin. Wyższe wskaźniki magazynowania węgla były silnie związane z obecnością traw typu C4 i roślin strączkowych w poletkach o większej bioróżnorodności. Takie wyniki są związane oczywiście z większą produkcją części nadziemnych i biomasa korzeni mieszanek traw ze strączkowymi (35).

Wyniki tych prac dowodzą, że zarówno duża bioróżnorodność roślin, jak i obecność specyficznych kombinacji cech funkcjonalnych roślin w runi mogą być potrzebne, aby zwiększyć tempo gromadzenia węgla organicznego w glebach zdegradowanych i na gruntach marginalnych (35).

Podsumowanie

W badaniach rolniczych i środowiskowych w ostatnich latach podkreśla się konieczność zwiększenia akumulacji węgla organicznego w glebie poprzez wdrażanie do uprawy gatunków roślin, które magazynują duże ilości CO₂, bezorkowego systemu uprawy roli (z siewem bezpośrednim włącznie), stosowanie nawozów organicznych i naturalnych. Z badań naukowych wynika, że nie ma jednoznacznie właściwej i uniwersalnej metody dla wszystkich gospodarstw rolnych. Możliwości zwiększenia sekwestracji węgla organicznego powinny być indywidualnie dostosowane do warunków glebowych i organizacyjnych gospodarstwa. W przypadku gleb lekkich, najlepszą metodą trwałej akumulacji węgla organicznego jest ich zalesienie – to daje ogromne możliwości sekwestrowania węgla organicznego. Użytki rolne zajmują, zaraz po lasach, 24% powierzchni lądów, odgrywając ogromną rolę w akumulacji węgla. Z punktu widzenia ochrony środowiska priorytetem powinna być ochrona lasów oraz nowe nasadzenia. Gleby leśne, z racji trwałej osłony oraz dużej depozycji organicznej, gromadzą na ogół większą pulę węgla organicznego niż grunty orne. Należy do niej zaliczyć także zasób węgla zawarty w nadziemnych i podziemnych częściach drzewostanów. W praktyce rolniczej pod uprawą znajduje

się przeważająca ilość gleb lekkich, których zalesienie nie jest możliwe. W takich przypadkach zaleca się uprawę międzyplonów ozimych, mieszanek traw z bobowatymi i zwiększanie areалу użytków zielonych. Wdrażanie bezorkowej uprawy roli jest rozwiązaniem dla dużych gospodarstw. Przyorywanie słomy na glebach lekkich nie zawsze przynosi zamierzony skutek, gdyż słoma w glebie z niedoborem wilgoci nie rozkłada się lub rozkłada trudniej i dłużej. Częste przyorywanie słomy może również wpływać niekorzystnie na rośliny i właściwości gleby. Najlepszym źródłem węgla organicznego w glebie, jak i trwałej frakcji materii organicznej pozostaje obornik. Gwałtowne zmiany temperatur sezonowych, zmiany wilgotności gleby (intensywne opady deszczu lub długie okresy suszy), fale upałów mają i będą miały w Polsce znaczący wpływ na właściwości gleby, zasoby wodne, a w efekcie akumulację lub straty węgla organicznego w glebie.

Literatura

1. Aleksandrowa L.N.: Органическое вещества почвы и его процессы трансформации, Materia organiczna i procesy jej transformacji, 1980, Nauka, Leningrad.
2. Berg B.: Decomposition of root litter and some factors regulating the process: Long term root litter decomposition in a Scots pine forest. *Soil Biol. Biochem.*, 1984, 16: 609–618.
3. Bęś A., Warmiński K.: Zmiany zawartości węgla organicznego w rekrutowanych glebach lekkich, 2015, *Prz. Nauk. Inż. Kszt. Środ.*, 67: 3-12.
4. Bleharczyk A., Małecka I., Sierpowski J.: Wpływ wieloletniego oddziaływania systemów uprawy roli na fizyko-chemiczne właściwości gleby. *Fragmenta Agronomica*, 2007, 1(93): 7-13.
5. Burzyńska I.: Współzależność między zawartością RWO w roztworze ekstrakcyjnym 0,01 mol CaCl_2 , a wybranymi składnikami mineralnymi w wodach gruntowych. *Woda, Środ. Obsz. Wiej.*, 2004, t.4., z. 2a(11): 525-535.
6. Burzyńska I.: Zawartość rozpuszczalnego węgla organicznego w mineralnej glebie i w płytkich wodach gruntowych na tle sposobu użytkowania łąki. *Pol. Journal of Agronomy*, 2012, 8:3-8.
7. Dieckmann J., Koch H.J.: Einfluss differenzierter Bodenbearbeitung auf Chemische Bodeneigenschaften und Zuckerrubenertrag. *Pflanzenbauwissenschaften*, 2008, 12(1): 22-31.
8. Dziadowiec H.: Glebowa materia organiczna (Materiały dla studentów specjalności gleboznawstwo ekologiczne), 2-89.
9. Faber A., Jarosz Z.: Modelowanie bilansu węgla organicznego w glebie oraz emisji gazów cieplarnianych w skali regionalnej oraz w Polsce. *Prob. Rol. Świat.*, 2018, 18 (XXXIII), 3:102-112.
10. Famielec J., Górka K., Stuczyński T., Wołkowicz S.: Oszacowanie kosztów wynikających z wdrażania w Polsce wymagań zawartych w projekcie dyrektywy parlamentu europejskiego i rady ustanawiającej ramy dla ochrony gleb oraz zmieniającej dyrektywę 2004/35/WE, 2007, Puławy-Warszawa-Kraków.
11. Franzluebbers A.J.: Soil organic master stratification ratio as a indicator of soil quality. *Soil Tillage Res.*, 2002, 66: 95-106.
12. Gruszczyński S.: Zmiany w środowisku glebowym i ich skutki. *Przyszłość: Świat-Europa-Polska, Problemy i Poglądy*, 2014, 2/30: 36-63.
13. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change., 2007, <http://ipcc-wg1.ucar.edu/wg1/wg1-report.html>.

14. Jaskulski D., Jaskulska I.: Współczesne sposoby i systemy uprawy roli w teorii i praktyce rolniczej. Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie Oddział w Poznaniu, 2016, 17-21.
15. Jones C., McConnell C., Coleman K., Cox P., Falloon P., Jenkinson D., Powelson D.: Global climate change and soil carbon stocks; predictions from two contrasting models for the turnover of organic carbon in soil. *Global Change Biology*, 2005, **11**: 154-166
16. Jurcova O., Bielek P.: Zdroje a straty podnej organicznej hmoty a ich bilancia. [In:] *Humic Subst. Environ.*, 1997, **1**: 7-12.
17. Komunikat Komisji Europejskiej do Rady Europejskiej, Parlamentu Europejskiego, Komitetu Ekonomiczno-Społecznego oraz Komitetu Regionów – W kierunku tematycznej strategii ochrony gleb. COM (2002) 179 wersja końcowa. Komisja Wspólnot Europejskich, Bruksela 2002.
18. Körschens M.: Humusbilanzierung. Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt VDLUFA, Bonn, 2004.
19. Krasowicz S., Kuś J.: Kierunki zmian w produkcji rolniczej w Polsce do roku 2020 – próba prognozy. *Zag. Ekon. Rol.*, 2010, Warszawa, **3**: 5-18.
20. Kuś J., Madej A.: Zagospodarowanie słomy a bilans materii organicznej. *Zag. Doradz. Roln.*, 2017, **4**: 40-55.
21. Kwiatkowska J.: Ocena możliwości wykorzystania węgla brunatnego jako efektywnego źródła materii organicznej. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 2007, **10(1)**: 71-85.
22. Lal R.: Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. *Science*, 2004, **304**, **5677**: 1623-1627.
23. Lal R.: Węgiel glebowy i nasilenie efektu cieplarnianego. *Rolnictwo polskie i ochrona jakości wody. Zesz. Eduk.*, 2000, **6**: 22-36.
24. Lenart S., Perzanowska A.: Wpływ płuźnej uprawy roli i siewu bezpośredniego na zawartość w glebie materii organicznej ekstrahowanej metodami fizycznymi. *Acta Agrophysica*, 2013, **20(4)**: 595-607.
25. Martyniuk S., Pikula D., Kozieł M.: Soil properties and productivity in two long-term crop rotations differing with respect to organic matter management on an Albic Luvisol. *Scientific Reports*, 2019, **9(1878)**: 1-9.
26. Małecka I., Swędryńska D., 2, 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.
27. Ochal P., Kopiński J.: Wpływ zakwaszenia gleb na środowisko i produkcję roślinną. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2017, **53(7)**: 9-25.
28. Pikula D.: Aktualne trendy w gospodarowaniu glebową materią organiczną. *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2013, **34(8)**: 109-124.
29. Sapek B.: Gleba jako źródło i „pułapka” na gazy cieplarniane. *Zesz. Eduk.*, 2000, **6**: 52-60.
30. Smagacz J.: Wpływ nawożenia słomą na plonowanie pszenicy ozimej, występowanie chorób podstawy źdźbła oraz niektóre właściwości chemiczne gleby. *Fragm. Agron.*, 2010, **27(1)**: 141-150.
31. Thomson I.K., Christensen B.T.: Field of wheat and soil carbon and nitrogen contents following long-term incorporation of barley straw and ryegrass catch crops. *Soil Use Manag.*, 2004, **20**: 432-438.
32. Wanic M., Kostrzewska M.K., Myśliwiec M., Brzezina G.M.: Wpływ wsiewek międzyplonowych i płodozmianu na niektóre fizyczne i chemiczne właściwości gleby. *Fragm. Agron.*, 2013, **30(1)**: 121–132.
33. West T., Post W.M.: Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analyses. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2002, **66**: 1930-1946.
34. Wójcik J.: Możliwości zwiększania sekwestracji węgla w ekosystemach leśnych w warunkach zmian klimatycznych. Gromadzenie węgla w glebie, ochrona materii organicznej Panel Ekspertów Klimat”, lasy i drewno a zmiany klimatyczne: zagrożenia i szanse. Instytut Badawczy Leśnictwa, 2013.

-
36. Yang Yi., Tilman D., Furey G., Lehman C.: Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity, *Nature Communications*, 2019, **10(1)**; <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08636-w>.
37. Zieliński M., Ziętara W.: Słoma jako alternatywne źródło energii lub materii organicznej w glebie. *Problems of Agricul. Econ. Zag. Ekon. Rol.*, 2018, **2(355)**: 28-40.
-

Adres do korespondencji:

*dr hab. Dorota Pikuła
Zakład Żywienia Roślin i Nawożenia
IUNG-PIB
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy
tel. 81 47 86 837
e-mail: dpikula@iung.pulawy.pl*

AUTOR

Dorota Pikuła

ORCID

0000-0003-4173-197X

