

Barbara Sapek

ZAPOBIEGANIE STRATOM I SEKWESTRACJA WĘGLA ORGANICZNEGO W GLEBACH ŁĄKOWYCH

Streszczenie. Omówiono zagadnienie węgla organicznego (C-org), jako niezbędnego składnika gleby kształtującego jej jakość, na tle dynamiki jego wymiany z węglem atmosferycznym w ujęciu regionalnym i globalnym. Przedstawiono jego źródła, formy występowania, funkcję i rolę, jaką spełnia w glebie i środowisku, ze szczególnym uwzględnieniem ekosystemów łąkowych. Podano i wyjaśniono przyczyny i drogi strat węgla organicznego z gleby wskutek emisji gazowych – CO₂, CH₄ (gazów cieplarnianych) oraz z powodu wymywania rozpuszczalnego węgla organicznego (RWO). Ponadto, podano sposoby sekwestracji węgla w glebie i sprzyjające jej metody gospodarowania materia organiczną (MO) w rolnictwie. Na podstawie literatury i badań własnych, przedstawiono użytki zielone, jako sposób rolniczego wykorzystania gruntów przyjazny zachowaniu węgla organicznego w glebie. Wykazano, iż ekosystemy łąkowe, mające znaczny udział w wymianie C-org w glebie i CO₂ z atmosfery, sprzyjają ograniczeniu jego strat z gleby i spełniają znaczącą rolę w zrównoważonym gospodarowaniu tym pierwiastkiem w środowisku.

WSTĘP

Gleba, jako siedlisko żywych organizmów, dziedzictwo człowieka i jego działalności oraz kształtująca krajobraz jest nieodnawialnym zasobem, wymagającym ochrony. W nowej strategii działań UE, przedstawionej w Komunikacie Komisji – COM(2006)231 [2006] oraz w Dyrektywie COM(2006)232 [2006] poświęcono temu zagadnieniu szczególną uwagę. Wśród raportów dotyczących strategii ochrony gleby, przygotowanych przez Grupy Robocze Komisji UE, materia organiczna gleby, jej wiązanie i przeciwdziałanie stratom stanowi oddzielne opracowanie obok takich problemów, jak erozja, zanieczyszczenie gleby i jej użytkowanie oraz monitoring [Reports... 2004].

Materia organiczna (MO) stanowi, w głównej mierze, o fizycznych, chemicznych oraz biologicznych właściwościach gleby i o jej kluczowej funkcji w środowisku. Bardzo złożone pochodzenie i skład oraz przemiany MO kształtują klimat, tj. temperatura i zawartość wody oraz użytkowanie gleby, co sprawia, iż zawartość węgla organicznego (C-org) w glebach jest bardzo zróżnicowana. Gleby leśne i łąkowe, z uwagi na swistość użytkowania, są zasobniejsze w C-org niż gleby orne, których uprawa, a zwłaszcza orka, sprzyja jego stratom w większym stopniu [Reports... 2004]. Straty C-org w wyniku przebiegających procesów glebowych, głównie mineralizacji, to emisje gazowe dwutlenku węgla (CO₂) i metanu (CH₄) – gazów cieplarnianych do atmosfery oraz wymywanie do wody gruntowej rozpuszczalnego węgla organicznego (RWO) [Lal 2000].

Barbara SAPEK – Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Raszyn.

Zmiany użytkowania ziemi oraz intensyfikacja produkcji rolniczej, również w Europie, prowadzące do degradacji gleby i strat C-org., a także przyczyniające się, obok innych źródeł, do tzw. „efektu cieplarnianego” wymagają skutecznych działań oraz wyprzedzających je badań naukowych w celu ochrony glebowej materii organicznej, której rola w zmieniających się warunkach przyrodniczych i socjalno-ekonomicznych nie jest do końca poznana [Lal 2000]. Zgodnie z poglądem Smith’a [2004], ilościowa ocena zmian zawartości węgla w glebach w wyniku obecnie obserwowanych zmian klimatycznych wymaga analizy licznej populacji różnorodnych próbek, w tym z wielu lat poprzedzających obserwowane zmiany.

WĘGIEL ORGANICZNY – NIEZBĘDNY SKŁADNIK GLEBY

Źródła. Węgiel organiczny zawarty w glebie stanowi istotny wkład w globalny bilans tego pierwiastka. Rozpatrując zasoby węgla organicznego w kontynentalnej biosferze, całkowity udział C-org w glebie, szacowany na 1500 Gt, jest znacznie większy od zasobów biomasy – 650 Gt oraz od jego zasobu w atmosferze – 750 Gt [Raports... 2004]. Zgodnie z definicją Prusińkiewicza [1999], glebowa materia organiczna zawiera resztki roślinne i zwierzęce w różnych stadiach mineralizacji i humifikacji oraz organiczne produkty działalności życiowej organizmów glebowych. Źródłem węgla w glebie jest wnoszona doń nadziemna i podziemna biomasa roślin oraz masa organiczna wprowadzana w różnej postaci nawozów organicznych (obornika, gnojówki, gnojowicy) w formie kompostów, osadów ściekowych itp. W zależności od rodzaju MO jej obrót i trwałość w glebie wynosi od niespełna roku do tysiąca lat. Świeży materiał roślinny (ściółka, resztki poźniwne) oraz mikroorganizmy glebowe ulegają mineralizacji oraz przemianom najszybciej (tab. 1). Proces darniowy przebiegający w glebach łąkowych sprzyja wzbogacaniu w MO górnej warstwy profilu takich gleb, nieraz o znacznej miąższości. [Reports... 2004]

Rola (funkcja). Materia organiczna w glebie jest głównym składnikiem kształtującym jej jakość oraz, co z tym związane, wpływa na tworzenie i trwałość agregatów glebowych. Ponadto, od jej zawartości zależą, między innymi, glebowa retencja wodna i bioróżnorodność oraz gęstość gleb, zwłaszcza mineralnych. Połączenia organiczno-mineralne stanowią pokarm żyjących organizmów glebowych i roślin. W wyniku mineralizacji MO, która odbywa się w warunkach tlenowych i najczęściej z udziałem

Tabela 1. Czas obrotu i trwałości różnego rodzaju materii organicznej w glebie (wg Reports of the Technical Working Groups... 2004)

Rodzaj materii organicznej	Czas trwałości (lata)
Biomasa mikroorganizmów	0,1–0,4
Ściółka lub resztki poźniwne	0,5–2
Biomasa makroorganizmów	1–8
Frakcja lekka humusu	1–15
Stabilny humus	20–1000

procesów mikrobiologicznych, powstają dostępne formy składników pokarmowych roślin, a jej zdolność buforowa i sorpcyjna przeciwdziała nadmiernemu zakwaszeniu gleby oraz stabilizuje zanieczyszczenia gleby środkami ochrony roślin i metalami ciężkimi [Stevenson 1994]. Zdolność produkcyjna i żywność gleby zależy od wymienionych właściwości zawartej w niej materii organicznej, która odgrywa swoistą rolę w utrzymaniu zrównoważonego i dobrej jakości środowiska.

Formy występowania w glebie. Węgiel organiczny w glebie występuje w postaci substancji humusowych odpornych na rozkład – próchnicy oraz substancji niehumusowych – tłuszczowców, węglowodanów i ligniny, z której w wyniku przemian i procesów chemicznych przebiegających w glebie tworzy się próchnica [Gorlach i Mazur 2002]. Organiczne związki węgla, jak i połączenia organiczno-mineralne mogą znajdować się w glebie w formie nierozpuszczalnej, związanej z masą glebową (C-org) oraz w formie rozpuszczalnej (RWO). W procesie mineralizacji MO w warunkach tlenowych węgiel ulega reakcji chemicznej utlenienia, a jej produktem jest nieorganiczna, gazowa forma węgla CO_2 , który to gaz zawarty jest również w powietrzu glebowym. W określonych warunkach temperatury i ciśnienia oraz jego stężenia w glebie ulega on emisji do atmosfery.

GLEBA JAKO ŹRÓDŁO EMISJI I WIĄZANIA WĘGLA ORGANICZNEGO

Przyczyny i drogi strat węgla organicznego z gleby. Węgiel organiczny w glebie jest silnie reaktywnym składnikiem, pozostającym w dynamicznej równowadze ze środowiskiem. Ta równowaga może być łatwo naruszona w wyniku działalności człowieka, zwłaszcza wskutek zmian użytkowania terenu lub niezrównoważonej działalności rolniczej. Nieprzemyślane i zbędne wylesianie terenów, a także zamiana naturalnych ekosystemów na rolnicze powoduje zanikanie C-org w glebie, czemu w tych warunkach sprzyja nasilenie erozji wodnej i wietrznej. Gleby naturalnych ekosystemów po włączeniu ich do produkcji rolniczej tracą od 25–50% początkowej zawartości MO [Lal 2000, Sapek B. 2000]. Lal [2000] wyróżnia czynniki oraz procesy, które wpływają na zanikanie i straty węgla organicznego w glebie. Wśród wymienionych już powyżej czynników biotycznych, Autor wyróżnia czynniki socjalno-ekonomiczne takie, jak:

- 1) inwestowanie w ziemię,
- 2) instytucjonalna pomoc,
- 3) dostęp do rynku.

Poza procesami fizycznymi, jak wspomniana już erozja, wymywanie RWO sprzyja zubożeniu gleby w węgiel. Z wymienionych przez Autora procesów chemicznych, zakwaszenie gleby, a także jej usuwanie przez nieracjonalne wapnowanie mogą być znacznym źródłem strat C-org z gleby.

Straty wskutek emisji gazowych – CO_2 , i CH_4 (gazów cieplarnianych). Emisji CO_2 z gleby do atmosfery, spowodowanej reakcją utlenienia C-org węgla, sprzyjają wszystkie zabiegi zwiększające dostęp do niej tlenu oraz wzrost temperatury. Podwyż-

szenie temperatury gleby o 10 °C podwaja wydajność mineralizacji i utlenienia C-org. Takie zabiegi, jak orka, mieszanie różnego rodzaju biomasy z powierzchniową warstwą gleby lub usuwanie z niej nadmiaru wody sprzyjają tym procesom i są źródłem CO₂ emitowanego do atmosfery. Gleby trwałych użytków zielonych są znacznie mniej wydajnym źródłem emisji tego gazu z uwagi na brak orki i są, obok lasów, sposobem gospodarowania sprzyjającym zatrzymywaniu węgla w glebie. Jednak zabiegi agrotechniczne takie, jak nawożenie i wapnowanie sprzyjające mineralizacji zwiększają emisję CO₂, co dokumentują, między innymi, wyniki badań Corré, Sapek B, Sapek A. [2000] na długoletnim doświadczeniu łąkowym, założonym w 1981 r. Stężenia tego gazu w powietrzu glebowym było największe na obiekcie kontrolnym bez nawożenia. Nawożenie gleby azotem powodowało zwiększenie emisji CO₂ i trzykrotne zmniejszenie jego stężenia w glebie. Podobne warunki stworzyło wapnowanie gleby wykonane jednorazowo, na początku doświadczenia (tab. 2).

Zmiana użytkowania łąk na grunty orne oraz „wylesianie” powodują ciągły przyrost emisji CO₂, którą szacuje się na około 23% całkowitej emisji tego gazu do atmosfery [Sapek 2000]. Gleby torfowe, ze swej natury bogate w MO, w warunkach sprzyjających natlenieniu są wydajnym źródłem emisji CO₂. Jak wykazali Czaplak i Dembek [2000], z łąk nienawadnianych na polskich torfowiskach emitowane jest w ciągu doby ponad 80 ton CO₂, a z łąk nawadnianych, o mniej korzystnych warunkach tlenowych, ta emisja wynosi ponad 60 t w ciągu doby (tab. 3).

W warunkach niedostatku tlenu, w glebie przebiega reakcja chemiczna redukcji związków węgla organicznego, której gazowym produktem jest metan. Jest on bardziej

Tabela 2. Stężenie dwutlenku węgla w powietrzu mineralnej gleby łąkowej; wpływ wapnowania i nawożenia azotem (wg Corré, Sapek B, Sapek A. 2000)

CO ₂ , ppmv					
Bez nawożenia (obiekt kontrolny)	Wapnowanie	Nawożenie			
		azotem		saletrą wapniową; Ca(NO ₃) ₂	saletrą amonową NH ₄ NO ₃
		120 kg·ha ⁻¹	240 kg·ha ⁻¹		
5030	1830	1710	1750	1630	1830

Tabela 3. Ilość emitowanego dwutlenku węgla do atmosfery z polskich torfowisk nieleśnych (wg Czaplak, Dembek 2000)

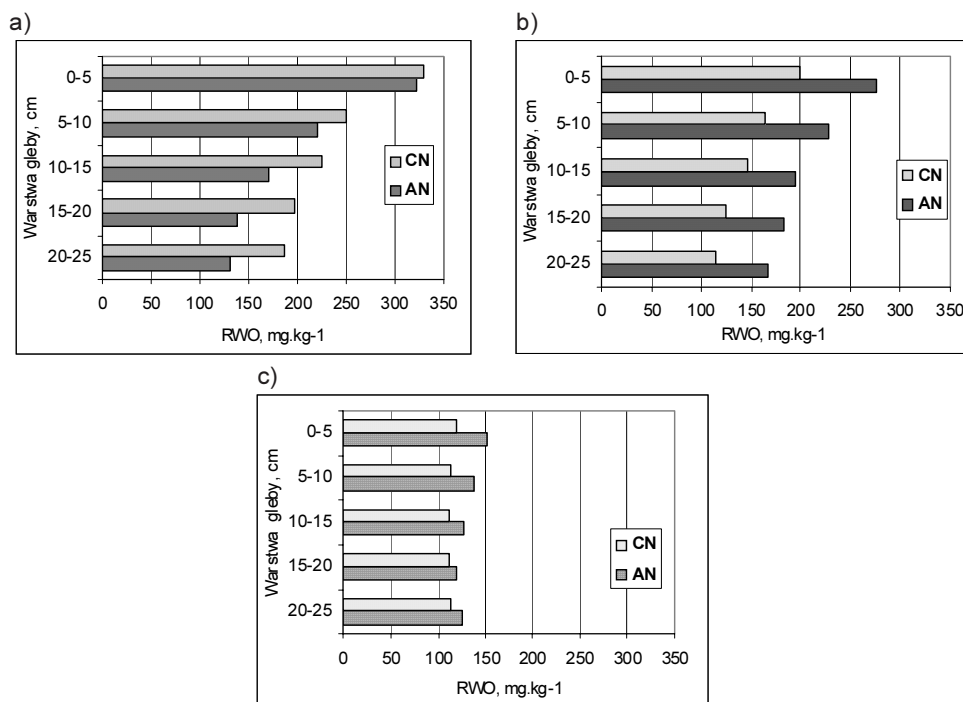
Grupa wilgotnościowa torfowisk	Powierzchnia, ha	Masa emitowanego CO ₂ do atmosfery, t·doba ⁻¹	
		łąki nienawadniane	łąki nawadniane
Łąki zmiennowilgotne – gleba Mtl	463 850	46 385	36 180
Łąki świeże i suche – gleba MtII	335 300	33 530	26 153
Łąki świeże i suche – gleba MtIII	17 650	1 059	829
Razem		80 974	63 163

aktywnym gazem cieplarnianym w porównaniu z dwutlenkiem węgla. Potencjał ocieplania CH_4 jest 58-krotnie większy od CO_2 . Jednak, w porównaniu z tym ostatnim, metan przebywa w atmosferze tylko około 12 lat, a dwutlenek węgla od 50–200 lat [Lal 2000]. Dlatego emisja CO_2 ma tak ważne znaczenia dla środowiska w skali globalnej. Źródłem emisji metanu, zwanego „gazem błotnym”, są mokradła, tereny zabagnione i zalewane, jak np. zalewane łąki naturalne czy uprawa ryżu. Metan tworzy się przy udziale bakterii metanogennych, których optymalne działanie występuje przy $\text{pH} = 7$. Dlatego emisja tego gazu z łąk kwaśnych jest mała [Sapek 2000].

Straty z powodu wymywania – rozpuszczalny węgiel organiczny RWO. Straty C-org z gleby jako skutek erozji wodnej to zmyw powierzchniowy i podpowierzchniowy frakcji lekkiej MO, intensywny w warunkach braku okrywy roślinnej. Gleby łąkowe z uwagi na całoroczne zadarnienie są w mniejszym stopniu narażone na straty C-org tą drogą. Natomiast duża zawartość w nich MO i mikroorganizmów glebowych sprzyja z reguły tworzeniu rozpuszczalnej formy węgla organicznego (RWO), co zwraca obecnie szczególną uwagę ze względu na straty glebowego węgla oraz rolę środowiskowego oddziaływanie RWO. Powstałe, rozpuszczalne i ruchliwe połączenia RWO ze składnikami mineralnymi gleby stwarzają możliwość ich wymywania w głąb profilu gleby, a dalej do wód gruntowych [Lal 2000, Weil i Magdoff 2004, Zaujec 2001, Zsolnay 2001].

W glebach użytków zielonych, organicznych i mineralnych, ze swej natury bogatych w związki węgla w wyniku procesu darniowego, wymywanie RWO i jego związków może odbywać się ze znaczną intensywnością, zwłaszcza w z wierzchniej warstwy 0–10 cm, bogatej w „makroskopową” materię organiczną [Burzyńska i in. 2000, Patra i in. 1999, Sapek i Burzyńska 1996]. Wydajność i dynamika tych procesów zależy od sposobu użytkowania gleb łąkowych. Tam, gdzie zaniechano ich rolniczego wykorzystania i pozostawiono bądź to jako odłogi lub tzw. użytki ekologiczne można się spodziewać odmiennego kierunku i nasilenia procesów mineralizacji i przemian związków węgla, co jest jeszcze obecnie mało rozpoznane. [Weil i Magdoff 2004, Zaujec 2001]. Zmiany zawartość RWO w wierzchniej, 25 cm warstwie gleby mineralnej z długoletniego doświadczenia łąkowego wykazały odmienny wpływ nawożenia azotem w formie saletry amonowej (AN) i saletry wapniowej (CN) w przypadku rolniczego użytkowania łąki i po jego okresowym zaniechaniu. W warunkach nieużytkowania, obserwowano zmniejszenie zawartość RWO w glebie uprzednio nawożonej azotem w formie CN, co wskazuje na ochronne działanie wapnia z nawozu i zmniejszenia ryzyka wymycia i strat węgla z gleby (rys. 1. a, b, c). Pozostały z uprzedniego nawożenia CN zapas jonów wapnia w glebie stabilizował strukturę materii organicznej, co w tych warunkach zmniejszało uwalnianie z niej RWO [Schuman 2000]. To zmniejszenie zawartości RWO może wskazywać na sekwestrację węgla, natomiast zwiększenie zawartości tej formy węgla może sprzyjać jego wymywaniu i stratom [Zsolnay 2001].

Wymywanie RWO z gleby potwierdza wykazywane stężenie tej formy węgla w roztworze glebowym i w wodzie gruntowej. Z utworów torfowych jest ono zazwyczaj intensywniejsze, co wykazały, między innymi, wyniki badań Sapka i in. [2006] wykonanych w latach 2001–2005 na torfowisku Kuwasy. W roztworze glebowym pozyskanym z warstwy 0–30 cm średnia stężenie RWO było równe $62 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, w wodzie



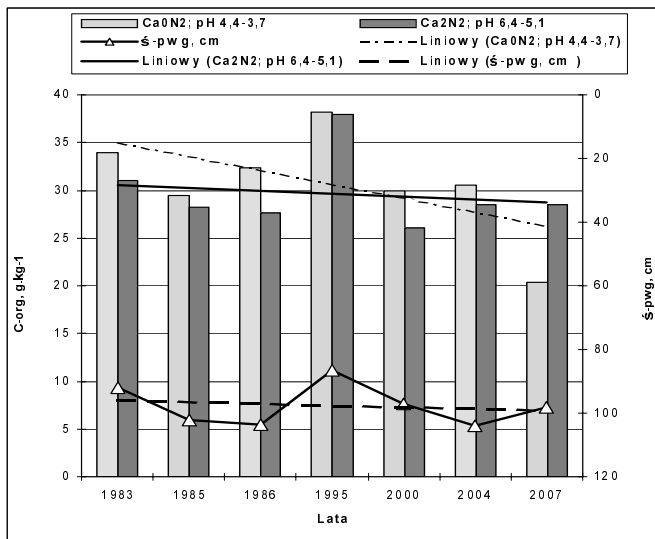
Rys. 1. Średnie z 6 obiektów nawozowych zawartości rozpuszczalnego węgla organicznego (RWO) w 5 cm warstwach gleby z doświadczenia na łąkowym na tle działania salety amonowej (AN) i salety wapniowej (CN): a) w warunkach użytkowania gleby łąki kośnej (2000 r.), b) i c) po zaniechaniu jej rolniczego użytkowania (2004 r. i 2007 r.)

gruntowej z w warstwy torfowej – $41 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$, a z warstwy mineralnej podścielającej torf równe $34 \text{ mg} \cdot \text{dm}^{-3}$. Wyniki te wskazują, iż mobilna forma węgla – RWO może być dobrym oraz prostym w oznaczeniu wskaźnikiem dynamiki węgla organicznego w glebie i w szeroko pojętym środowisku przyrodniczym [Zsolney 2001].

PRZECIWDZIAŁANIE STRATOM I SEKWESTRACJA WĘGLA W GLEBIE

Czynniki sprzyjające stratom węgla z gleby. Lal [2000] stwierdza, że straty węgla w większości gleb na świecie w wyniku zamiany terenów naturalnych na rolnicze szacuje się, w ujęciu „historycznym”, na 50%. Te straty w obszarze klimatu umiarkowanego nastąpiły w ciągu ostatnich 40–50 lat. Autor uważa, iż uzupełnienie tych strat jest możliwe w większości gleb w 60–80%. Jednak zwiększenie zawartości C-org jest możliwe częściej w warunkach ekosystemów na nowo zagospodarowanych niż w ekosystemach naturalnych, z uwagi na ograniczenia wynikające z właściwości ich gleb [Lal 2000].

Zanikanie węgla obserwowano, między innymi, w glebie mineralnej, zasobnej w C-org ($38 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) i o korzystnych warunkach wilgotnościowych z długoletniego doświadczenia łąkowego, założonego w 1982 r. w IMUZ. Szczegółowy opis doświadczenia zawiera oddzielna praca [Sapek, 2006]. Stwierdzono zmniejszanie zawartości C-org w latach badań 1983–2007, w warunkach gleby ulegającej w tym czasie silnemu zakwaszeniu (pH-KCl 4,4–3,7) To zmniejszanie w miarę upływu lat było statystycznie istotne ($r = -0,70^*$) z wykluczeniem roku 1995, znacznie odbiegającego od pozostałych lat badań. Znacznie mniej intensywnie zmniejszenie C-org obserwowano w tym czasie w glebie uprzednio wapnowanej, w której zmiana pH-KCl mieściła się w zakresie 6,4–5,1. Zmiany te ilustrują wykreślone linie trendu, na których podstawie można oszacować średnie zmniejszenie zawartości C-org po 24 latach o $8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ na silnie kwaśnej glebie i o $1,5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ na glebie o mniej kwaśnym odczynie. W obydwu przypadkach, straty C-org z gleby były istotnie skorelowane z obniżeniem poziomu wody gruntowej ($r_1 = -0,83^*$, $r_2 = -0,82^*$) (rys. 2).



Rys. 2. Średnie roczne zawartości węgla organicznego (C-org) w 0–10 cm warstwie gleby mineralnej z obiektów nawożonych $240 \text{ kg N}\cdot\text{ha}^{-1}$, niewapnowanych (Ca_0N_2) i wapnowanych (Ca_2N_2), doświadczenia łąkowego oraz średnie roczne poziomy wody gruntowej (ś -pwg) w latach 1983–2007; zaznaczone linie trendu zmian w latach badań

Pojęcie „sekwestracji” węgla i sprzyjające jej gospodarowanie MO w rolnictwie. Stwierdzany proces zanikania C-org w glebach wskutek emisji gazowych i wymywania spowodował działania w kierunku odnowy MO gleby i zwiększenia wiązania glebowego węgla organicznego – jego sekwestracji. To pojęcie, które ukazało się w naukowej literaturze anglosaskiej, wprowadzono głównie w odniesieniu do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych do atmosfery. Stosuje się je również do procesów glebowych ograniczających emisję i straty węgla [Lal 2000].

Jak podaje Lal [2000], można wyróżnić trzy główne kierunki działania zmierzające do zwiększenia wiązania węgla w glebie. Pierwszy z nich to przeciwdziałanie procesom erozyjnym (mulczowanie gleby, utrzymywanie na niej okrywy roślinnej, racjonalna gospodarka pastwiskowa) oraz ograniczenie intensywności mineralizacji MO w glebie (zachowanie właściwej struktury i zasobności gleby w składniki nawozowe, odmiany roślin uprawnych trudniej ulegających rozkładowi). Drugim kierunkiem działań są wszelkie sposoby zwiększające zawartość C-org w glebie (zwrot do gleby większej ilości biomasy, stosowanie nawozów organicznych, polepszenie gospodarowania wodą i składnikami pokarmowymi roślin). W tym zakresie działań mieści się doskonalenie obiegu składników nawozowych. Trzeci kierunek prowadzi do zwiększenia zawartości węgla w plonach przez intensyfikację produkcji rolnej, również na terenach marginalnych i stosowanie praktyk rolniczych sprzyjających zwiększeniu ilości biomasy i dodatniemu bilansowi węgla.

Gospodarowanie glebową materią organiczną (MO) w rolnictwie. Zrównoważone gospodarowanie w rolnictwie glebową materią organiczną polega na działaniach zwiększających wnoszenie MO do gleby i równoległe zmniejszających jej straty z gleby [Robert 2001]. Produkcja roślinna oraz pozostałości po plonach są głównym źródłem wnoszenia MO do gleby. Sprzyjać temu będą: i/ zwiększenie produkcji biomasy przez stosowanie odpowiedniej selekcji odmian, nawożenie i nawodnienie, ii/ zmiana struktury wykorzystania gruntów tj. zalesianie i użytki zielone, iii/ zwiększenia resztek poźniowych, mulczowanie, stosowanie nawozów organicznych, obornika, iv/ stosowanie kompostów z osadów ściekowych. Zmniejszenie strat MO z gleby zmierza przede wszystkim w kierunku ograniczenia jej mineralizacji i wynikającej z tego emisji CO₂ oraz przeciwdziałanie erozji, co można osiągnąć przez:

- 1) stosowanie praktyk rolniczych sprzyjających temu ograniczeniu, orkę zachowawczą lub braku orki,
- 2) utrzymywanie okrywy roślinnej gleby lub pozostawienie na niej resztek roślinnych,
- 3) warunki anaerobiozy (rys. 3) [Robert 2001].



Rys. 3. Praktyki rolnicze sprzyjające ograniczeniu strat materii organicznej (MO) z gleby (wg Robert 2001)

GLEBY ŁĄKOWE – SPOSÓB UŻYTKOWANIA PRZYJAZNY ZACHOWANIU WĘGLA ORGANICZNEGO W GLEBIE

Działania na rzecz zrównoważonego gospodarowania glebową MO, mogą one być spełnione w większym stopniu na glebach łąkowych ze względu na ich swoistą naturę. W przypadku trwałych użytków zielonych, całoroczne pokrycie gleby roślinnością sprzyja wiązaniu węgla z atmosfery w procesie asymilacji dwutlenku węgla przez rośliny, niezbędnego do wytworzenia biomasy zarówno naziemnej, jak i korzeniowej [Reports... 2004. Proces darniowy to kolejne źródło wiązania MO w glebach łąkowych. W tych warunkach równolegle przebiega, odwrotny do mineralizacji, proces immobilizacji węgla organicznego, który to składnik jest niezbędnym materiałem energetycznym dla mikroorganizmów heterotroficznych w glebie, której słabo kwaśny odczyn sprzyja wzmożonej ich aktywności [Robson i Abbot 1989].

W przypadku silnego uwodnienia gleb łąkowych, zwłaszcza torfowych, zmniejsza się dostęp tlenu, czemu towarzyszy wysoki poziom wody gruntowej. Skutkiem tego jest zmniejszenie zawartości produktu utlenienia węgla organicznego – CO₂ i jego emisji do atmosfery oraz strat z gleby. Mniejsze jest również wymywanie RWO, a także azotanów i fosforanów z gleby, co ilustrują wyniki oznaczeń stężenia tych składników w wodzie gruntowej spod łąk i lasu brzoźowego na torfowym obiekcie Kuwasy (tab. 4) [Jaszczyński i in. 2006]. Należy jednak pamiętać, że warunkom anaerobiozy towarzyszy reakcja chemiczna redukcji azotanów, czego skutkiem będzie emisja podtlenu azotu (N₂O), również gazu cieplarnianego [Sapek 2000].

Tabela 4. Średni poziom wody gruntowej (p.w.g.) oraz stężenie rozpuszczalnego węgla organicznego (RWO), azotanów(NO₃) i fosforanów (PO₄) w wodzie gruntowej spod lasu brzoźowego i łąk na glebach torfowych (wg Jaszczyński i in.)

Użytkowanie	p.w.g., cm	Stężenie składnika, mg·dm ⁻³		
		RWO	NO ₃	PO ₄
Las brzoźowy	70	106,3	255,1	3,82
Łąka I	43	64,9	43,6	2,34
Łąka II	39	70,5	30,2	2,15

Nawożenie mineralne i organiczne, zwłaszcza azotem, zwiększając plony runi łąkowej, jednocześnie sprzyja intensywniejszemu wykorzystaniu atmosferycznego CO₂ i wiązaniu węgla [Lal 2000]. Ilustrują to, między innymi, zawartości C-org w 0–10 cm warstwie mineralnej gleby z doświadczenia łąkowego nawadnianego deszczowniano po upływie 10 lat od jego założenia [Burzyńska i in. 2000]. W warunkach gleby łąkowej, pozbawionej stresu suszy, stosowanie największej dawki azotu – 360 kg N·ha⁻¹, zarówno w formie mineralnej (saletry amonowej), jak i mineralno-organicznej (z dodatkiem przefermentowanej gnojówki) najbardziej wzbogaciło glebę w C-org (tab. 5). Mimo, że nawożenie saletrą amonową, zwłaszcza większymi dawkami, powoduje zakwaszenie gleby, nie stwierdzono ujemnego jego wpływu w warunkach łąki nawadnianej.

Tabela 5. Zawartość węgla organicznego (C-org) w warstwie 0–10 cm z doświadczenia nawadnianego deszczowniano po dziesięciu latach od jego założenia

Warstwa, cm	Dawka azotu, kg·ha ⁻¹					
	Zawartość C-org, g·kg ⁻¹					
	60 (m)	120 (m)	240 (m)	360 (m)	240 (mo)	360 (mo)
0–5	16,1	15,8	17,2	21,7	18,1	19,4
5–10	14,0	11,8	10,6	14,1	12,7	13,6
x (0–10)	15,0	13,8	13,9	17,9	15,4	16,5
	pH-KCl					
0–10	6,0	5,7	5,2	4,5	5,9	5,4

m – Nawożenie mineralne, mo – nawożenie mineralno-organiczne.

Jak podaje Opitz von Boberfeld [1994], optymalne ze względu na korzystny skład botaniczny runi i jej wartość pokarmową pH gleby, mieści się średnio w zakresie 5,0–6,5. Utrzymanie słabo kwaśnego odczynu przez racjonalne wapnowanie gleb łąkowych, mniej aktywną, węglanową formą wapna, a także stosowanie nawozów zawierające wapń, np. saletry wapniowej, stymuluje wiązanie węgla w glebie, zwłaszcza mało zasobnej w ten składnik [Sapek, Burzyńska, 1996]. Średnie z lat 1983–2007 zawartości C-org w silnie kwaśnej glebie (pH-KCl 3,8) nawożonej azotem w ilości 240 kg·ha⁻¹ (N₂) obiektu niewapnowanego (Ca₀) z długoletniego doświadczenia łąkowego o opadowej gospodarce wodą i obiektów wapnowanych jednorazowo, przy zakładaniu doświadczenia (pH-KCl 4,9–5,8) były podobne (17,9–18,0 g·kg⁻¹). Zmniejszenie dawki zakwaszającego glebę nawozu azotowego do 120 kg·ha⁻¹ (N₁) przy jednoczesnym zastosowaniu nawozu wapniowego utrzymującego optymalne dla użytków zielonych pH gleby sprzyjało wzbogaceniu gleby w C-org (tab. 6).

W przypadku łąk użytkowanych pastwiskowo warunkiem ograniczenia strat i wiązania węgla w glebie, poza koniecznością zrównoważonego nawożenia, jest racjonalna obsada bydła, na co wskazują w swej pracy Soussana i in. [2004]. Jest to konieczny warunek, aby kolejnym źródłem strat węgla nie stała się emisja metanu. Według opinii Autorów, w przypadku Francji, zwiększenie sekwestracji węgla w glebach jest możliwe rezygnując z przemiennej użytkowania gleb w rotacji uprawy polowe – trawy na

Tabela 6. Średnia zawartość węgla organicznego (C-org) w 0–10 cm warstwie gleby niewapnowanej i wapnowanej z długoletniego doświadczenia w miejscowości Janki w warunkach nawożenia saletrą amonową, w latach 1983–2007

Cecha	Obiekty nawozowe ¹⁾					
	Ca ₀ N ₁	Ca ₀ N ₂	Ca ₁ N ₁	Ca ₁ N ₂	Ca ₂ N ₁	Ca ₂ N ₂
C-org, kg ⁻¹ s.m.	15,9	17,9	16,2	17,8	18,0	17,8
pH-KCl	4,0	3,8	5,2	4,9	5,8	5,3

W% – Współczynnik zmienności C-org.

rzecz przywrócenia trwałych użytków zielonych i znacznego ograniczenia intensywnej hodowli bydła.

Ekosystemy łąkowe odgrywają znaczącą rolę zarówno w regionalnej, jak i globalnej wymianie węgla atmosferycznego (CO_2) i węgla organicznego (C-org) w glebie. Dynamika tej wymiany, w ujęciu historycznym, w obecnych czasach jak i jej prognozy na przyszłość są ważnym zagadnieniem ze względu na obserwowane zmiany klimatyczne. Badania, które wykonali Follet, Paul i Leavitt [<http://www.Itrr...>], z zastosowaniem izotopu węgla ^{14}C , na 9 różnych obiektach łąkowych w Stanach Zjednoczonych wskazały na ważną rolę warstw gleby najbliższych powierzchni w przeciwdziałaniu stratom węgla glebowego. Autorzy wykazali, między innymi, że średni czas przebywania w glebie połowy C-org, która ulega sekwestracji poniżej 20 cm od powierzchni jest większy niż 1000–2000 lat. Ten czas przebywania węgla glebowego, zalegającego na głębokości około 200 cm wynosi od 9000 do 13000 lat, lecz jest to tylko około 5% całkowitej zawartości węgla w glebie. Tak więc ogromne ilości węgla glebowego, które uległy raz sekwestracji pozostały w profilu gleby na bardzo długi czas [Follet, Paul, Leavitt, <http://www.Itrr...>].

Gill i in. [2002] wykazali, iż zwiększenie zasobów węgla glebowego w ekosystemach łąkowych w wyniku wiązania CO_2 atmosferycznego w przeszłości było znacznie większe w porównaniu z bieżącym stuleciem. Jak sądzą Autorzy, różnica między wrażliwością magazynowania węgla atmosferycznego w tych ekosystemach w ujęciu historycznym i w przyszłości, jak i zwiększone ograniczenie składników pokarmowych roślin sugerują, że pasywna sekwestracja węgla w glebie mogła być istotna w ujęciu historycznym. Natomiast zdolność gleb ekosystemów łąkowych do kontynuowania obecnej roli „pułapki” na CO_2 jest ograniczona. Zhang i in. [2007] stwierdzili, że zatrzymywanie węgla w glebie i wymiana między węglem atmosferycznym jest procesem bardzo dynamicznym i zróżnicowanym oraz zależnym od zmian klimatu glebowego. Autorzy, prowadząc badania empiryczne i modelowe na ośmiu typowych użytkach zielonych z rejonu Płaskowyżu w Tybecie, wykazali zróżnicowaną, czasową zmienność tej wymiany w latach 1960–2002 w przykładowych ekosystemach. Wyniki oznaczeń C-org w 0–20 cm warstwie gleb górskich użytków zielonych

odpowiadały zmianom klimatu w ciągu 42 lat badań. Ponadto stwierdzono, iż szybkość wymiany węgla netto między górnymi ekosystemami łąkowymi i węglem atmosfery w latach 1990–2000 zwiększyła się w porównaniu z okresem przed rokiem 1990 [Zhang i in. 2007]

PODSUMOWANIE

Zawartość węgla w materii organicznej stanowi w głównej mierze o żyzności gleby. Jest wskaźnikiem jej jakości oraz oddziaływania człowieka na agroekosystemy, również na ekosystemy naturalne. Skutkiem tego oddziaływania są zazwyczaj straty glebowego węgla organicznego (C-org) w wyniku emisji gazowych – dwutlenku węgla (CO_2) i metanu (CH_4), a także na drodze wymywania z gleby rozpuszczalnego węgla organicznego (RWO).

Warunki wodne panujące w glebie oraz, z tym związane, procesy redukcyjno-oksydacyjne decydują o rodzaju emitowanego gazu. Skutkiem procesu mineralizacji organicznych związków węgla przebiegającego w warunkach dobrego natlenienia gleby jest CO₂, końcowy produkt reakcji chemicznej utlenienia C-org. Emitowany do atmosfery CO₂ asymilują rośliny tworząc biomasę, która w określonych warunkach wraca do gleby, by ponownie ulec mineralizacji. Część całkowitej zawartości glebowego węgla organicznego obecna w niej w formie rozpuszczalnej (RWO) może ulec wymyciu w sprzyjających warunkach fizyczno-wodnych panujących w glebie, zwiększając straty węgla powodowane emisją jego związków gazowych.

Najkorzystniejsze warunki do pewnego domknięcia tego obiegu węgla stwarzają ekosystemy łąkowe, zwłaszcza trwałe użytki zielone ze względu na przebiegający w nich proces darniowy i całoroczną okrywą roślinną będącą „konsumentem” zarówno dwutlenku węgla, jak i rozpuszczalnego węgla organicznego. W naturalnych ekosystemach łąkowych, mokradłach, w większości usytuowanych na glebach torfowych, panujące warunki wodne i tlenowe w większym stopniu sprzyjają emisji metanu, a także stratom RWO. W warunkach rolniczego użytkowania łąk, kośnego bądź to pastwiskowego, stosowane praktyki rolnicze mogą zmierzać zarówno w kierunku zwiększenia lub ograniczenia strat C-org z gleby, jak również do jego wiązania i sekwestracji. Działania zwiększające plony runi łąkowej, takie jak nawożenie mineralne oraz organiczne, zwłaszcza nawożenie azotem, a w przypadku suszy nawodnienie zwiększają pobieranie węgla atmosferycznego i sprzyjają jego zatrzymywaniu w glebie. Usuwanie nadmiernej kwasowości gleby i utrzymanie korzystnego dla roślinności łąkowej słabo kwaśnego odczynu przez racjonalne wapnowanie i stosowanie nawozów zawierających w swym składzie wapń, sprzyja utrzymaniu optymalnego statusu wapnia sprzyjającego aktywności mikrobiologicznej gleby łąkowej i w ten sposób jego wiązaniu i sekwestracji. Użytkowanie pastwiskowe spełnia podobną rolę w gospodarowaniu węglem glebowym jak użytkowanie kośne. Jest jednak ono uwarunkowane ograniczeniem intensywności hodowli i obsady bydła. W przeciwnym bowiem razie prowadzi do degradacji gleby i darni, co niszczy jej zdolność do zatrzymywania węgla i sprzyja stratom w wyniku emisji gazowych.

Wymiana węgla między atmosferą i ekosystemami zarówno lądowymi, jak i wodnymi odbywa się nieustannie. Dynamika tej wymiany nabiera szczególnego znaczenia w obecnych czasach w związku z obserwowanymi zmianami klimatycznymi spowodowanymi, jak się uważa, tzw. efektem cieplarnianym. Wykazano, iż ekosystemy łąkowe mają znaczny udział w tej wymianie, a z uwagi na swoiste cechy sprzyjające ograniczeniu strat glebowego węgla organicznego spełniają znaczącą rolę w zrównoważonym gospodarowaniu tym pierwiastkiem w środowisku.

PIŚMIENNICTWO

1. Burzyńska I., Barszczewski J., Sapek B. 2000: Następczy wpływ nawożenia mineralnego i organiczno-mineralnego na zawartość węgla organicznego i azotu ogólnego w glebie łąki trwałej deszczowanej. *Wiad. IMUZ*, 21, 1: 21–29.

2. Czaplak, I., Dembek W. 2000. torfowiska Polski jako źródło emisji dwutlenku węgla. *Zeszyty Edukacyjne*, 6: 61–70.
3. COM(2006)231 final. Brussels 22.09.2006. Communicat from the Commission to the Council, the Eurpean Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Thematic Strategy for Soil Protection.
4. COM(2006)232 final Brussels, 22.09.2006. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC.
5. Corré W.J., Sapek B., Sapek A. 2000. W: Effect of liming and nitrogen fertilizer application on soil acidity and gaseous nitrogen oxide emissions in grassland systems. Edit.O. Oenema i A. Sapek. Falenty IMUZ Publisher: 38–44.
6. Follet R.F., Paul E., Leavitt S.W. Soil carbon sequestration and age in the historic grasslands of the United States. [<http://www.Itrr.arizona.edu/~sleavitt/GreatPlainsSoil.htm>]
7. Gill R.A., Polley H.W., Johnson H.B., Anderson L.J., Maherali H., Jackson R.B. 2002. Non-linear grassland responses to past and future atmospheric CO₂. *Nature*, Vol. 417: 279–282.
8. Górlach E., Mazur T. 2002. *Chemia rolna*. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa.
9. Jaszczyński J., Chrzanowski S., Sapek A. 2006. *Polish J. Environ. Stud.*, Vol. 15, No. 5d, 75–79.
10. Lal R. 2000: Węgiel glebowy i nasilenie efektu cieplarnianego. *Rolnictwo polskie i ochrona jakości wody. Zeszyty Edukacyjne*, 6: 22–36.
11. Patra A.K., Jarvis S.C., Hatch D.J. 1999: Nitrogen mineralization in soil layers, soil particles and macro-organic matter under grassland. *Biol. Fertil. Soils.*, 29: 38–45.
12. Prusińkiewicz Z. 1999. *Środowisko i gleby w definicjach*. Oficyna Wydawnicza „TUR-PRESS”. Toruń.
13. Reports of the Technical Working Groups establish under the thematic strategy for soil protection. 2004. Van Camp L., Bujarrabal B., Gentile A.R., Jones R.J.A., Montanarell L., Olazabal C., Selvaradjou S.K. (praca zbiorowa). European Environment Agency. EUR 21319 EN/3.
14. Robert M. 2001. Soil carbon sequestration for improved land Management. *World Soil Resources Report 96* FAO. Rome 57. (cyt. Reports...2004).
15. Robson A. D, Abbot L. K. 1989. Soil acidity and plant growth. Pod red. A.D. Robsona, Academic Press, 139.
16. Sapek A., Sapek B., Chrzanowski S., Jaszczyński J. 2006. Transfer of substances from soil solution in peat soil to ground – and surface water. *Polish J. Environ. Stud.*, Vol. 15, No. 5d: 367–374.
17. Sapek B. 2000. Gleba jako źródło i „pułapka” na gazy cieplarniane. *Zeszyty Edukacyjne*, 6: 52–60.
18. Sapek B. 2006. Przedmowa W: Azot, fosfor i potas w glebie oraz plonowanie trwałego użytku zielonego na długoletnich doświadczeniach łąkowych. Red .nauk. B. Sapek. *Woda Środowisko Obszary Wiejskie*, t. 6, Zesz. Spec. 17: 5–14.
19. Sapek B., Burzyńska I. 1996: Effect of liming on organic carbon content in the mineral soil of permanent grassland. *Pol. J. Soil Sci.*, XXIX/2: 113–120.
20. Schuman G. 2000: Effect of CaCl₂ on the kinetics of dissolved organic matter release from sandy soil. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 163: 523–529.
21. Smith P. 2004. How long before a change in soil organic carbon be detected? *Global Change Biology*, 10: 1878–1883.
22. Stevenson J. 1994. *Humus chemistry – genesis, composition, reactions* (2nd Edition. John Wiley and Sons, Chichester. (cyt. Reports... 2004).

23. Soussana J. F., Loiseau P., Vuichard N., Ceschia E., Balesdent J., Chevallier T., Arrouays d. 2004. Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management*, Vol. 20, No. 2, supplement: 219–230.
24. Weil R.R., Magdoff F. 2004: Significance of soil organic matter to soil quality and health. W: *Soil organic matter in sustainable agriculture*. Ed. F.Magdoff, Weil R.R. CRC Press London.
25. Zaujec A. 2001: Soil organic matter as indicator of soil quality and human influences on agroecosystem and natural forest ecosystem. W: *Soil Anthropization VI. Proceedings*. Ed. J. Sobocka. International Workshop Bratislava, Slovakia: 165–174.
26. Zhang YQ., Tang YH., Jiang J., Yang YH. 2007. Characterizing the dynamics of soil organic carbon in grasslands on the Qunghai-Tibetian Plateau. *Sci. China Ser. D: Earth Sci.*, Vol. 50, No. 1: 113–120.
27. Zsolnay A. 2001. The prediction of the environmental function of the dissolved organic matter (DOM) in ecosystems. ESF Exploratory Workshop. Beilngries, Germany. Scientific Report: 1–18.

PREVENTION AND SEQUESTRATION OF THE ORGANIC CARBON LOSSES IN GRASSLAND SOILS

Summary

The problem of organic carbon (C-org), as an essential soil element that forms its quality was discussed on the background of the exchange with atmospheric carbon at the regional and global scale. There were presented the sources, forms, function and role of C-org that plays in the soil and in the environment, particularly in the grassland ecosystems. There were shown and explained the reasons and ways of losses of organic carbon from the soil on the account of gaseous emission – CO₂, CH₄ – greenhouse gases and as an effect of the leaching of dissolved organic carbon (DOC). Moreover, it was shown the mode of carbon sequestration in soil and a sound methods of organic matter (OM) management in agriculture. On the literature basis and on our own investigations, grasslands were presented as a friendly mode of soil use for organic carbon preservation. It was shown, that grassland ecosystems, playing an important part in the exchange between C-org in soil and CO₂ in atmosphere, favours the limitation of carbon losses from the soil and takes part a significant role in the sustainable management of this element in the environment.

Key words: grassland soils, losses, organic carbon, sequestration, counteraction.