

WPŁYW SPOSOBU UŻYTKOWANIA LASU NA ZAPASY WĘGLA ORGANICZNEGO W GLEBIE

Marek Degórski

Degórski M., 2005: Wpływ sposobu użytkowania lasu na zapasy węgla organicznego w glebie (*Influence of forest management into the carbon storage in soil*), Monitoring Środowiska Przyrodniczego nr 6, s. 75-83, Kieleckie Towarzystwo Naukowe, Kielce.

Zarys treści: Znacząca część światowych zapasów węgla zakumulowana jest w leśnych glebach ekosystemów lądowych. Obok naturalnych czynników wpływających na kształtowanie się zapasów węgla w glebie, coraz większą rolę odgrywają także procesy antropogeniczne, między innymi sposób użytkowania lasu. Celem pracy jest określenie wpływu żyzności siedlisk, jak i działalności gospodarczej człowieka, jaką prowadził w dwu zbiorowiskach leśnych: grądzie (*Tilio Carpinetum*) i mieszanym borze sosnowo-świerkowym (*Quercus-Pinetum*), na wielkość zapasów węgla organicznego w glebach tych ekosystemów, odpowiednio płowych i rdzawych. Badania wykonano w Białowieskim Parku Narodowym. Otrzymane wyniki wskazują na istotny statystycznie negatywny wpływ żyzności siedlisk na wielkość zapasu węgla organicznego w glebie. W pracy wykazano również wpływ gospodarczego użytkowania lasu na obniżenie naturalnej żyzności gleb, a w konsekwencji na wzrost zapasów węgla w glebach ekosystemów, w których prowadzono użytkowanie w porównaniu z lasami objętymi od dziesięcioleci ochroną prawną.

Słowa kluczowe: gleby płowe, gleby rdzawe, sposób użytkowania lasu, zapas węgla organicznego.

Marek Degórski, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa
Twarda 51/55, 00-818 Warszawa, m.degor@twarda.pan.pl

1. Wprowadzenie

W obliczu zachodzących procesów cywilizacyjnych prowadzących do szybkich przemian właściwości komponentów środowiska przyrodniczego, bilans węgla ma coraz większe znaczenie nie tylko dla prawidłowego funkcjonowania ekosystemów, ale również dla rozwoju społeczno-gospodarczego wielu regionów świata. Szczególną rolę w kształtowaniu się bilansu węgla odgrywa gleba, która spełnia bardzo ważną rolę w dekompozycji materii organicznej oraz magazynowaniu zapasów węgla, zwłaszcza węgla organicznego. Szacuje się, że ogólny zapas węgla w pedosferze przekracza 3,2-krotnie jego zawartość w atmosferze oraz 4,1-krotnie zawartość w żywych organizmach, a około 2/3 zapasu węgla leśnych ekosystemów lądowych strefy klimatu umiarkowanego to jego zapasy w glebie (Post et al., 1990).

Tym samym gleba, jako główny rezerwuuar węgla magazynowanego w środowisku przyrodniczym, pod-

legać musi szczególnej uwadze badawczej, zwłaszcza w ekosystemach leśnych. Gleby tych ekosystemów charakteryzują się dużą dynamiką zawartości węgla zależną od sposobu zagospodarowania lasu, jak i olbrzymimi stratami węgla w przypadku zmiany ich użytkowania, szczególnie z leśnego na rolnicze. Straty te wynosić mogą nawet około 50% zapasu węgla po upływie 5-10 lat gospodarowania rolniczego w klimacie tropikalnym i 40-50 latach gospodarowania rolniczego w warunkach klimatu umiarkowanego (Lal, 2000). Dodatkowo na zmniejszanie się zapasu węgla w glebie ma sygnalizowany od lat efekt cieplarniany i związane z nim zmiany klimatu, charakteryzujące się podwyższaniem średniej rocznej temperatury powietrza, a tym samym i temperatury gleby (Degórski, 2000; Lawton, 2000). Powszechnie wiadomo, że zarówno rozkład materii organicznej, jak i jej mineralizacja zależą od warunków termicznych. Z dotychczasowych badań wynika, że podniesienie temperatury powietrza o 10°C powoduje dwukrotne zwiąk-

szenie wydajności tych procesów, a tym samym uwalnianie dużych ilości CO₂ do atmosfery, z których tylko 60-80% może być ponownie wiązane przez glebę (Lal, 2000).

Celem prezentowanych badań jest określenie wpływu naturalnej żyzności siedlisk oraz sposobu użytkowania lasu na wielkość zapasu węgla w glebach dwu zbiorowisk leśnych Białowieskiego Parku Narodowego charakteryzujących się ponad stuletnim drzewostanem: grądu (*Tilio Carpinetum*) z pokrywą glebową gleb płowych i mieszanego boru sosnowo-świerkowego (*Quercu-Pinetum*) z glebami rdzawymi. Analizowane ekosystemy cechują się dojrzałymi pedonami wykształconymi w okresie plejstocenu i holocenu.

2. Metody

2.1. Badania terenowe

Badania przeprowadzono w latach 1998-2001 na terenie Białowieskiego Parku Narodowego, w trakcie pięciu pobytów studialnych. W czasie każdego z nich pobierano próby glebowe ze wszystkich poziomów genetycznych 80 profili glebowych. Czterdzieści spośród nich reprezentowało zidentyfikowane według Polskiej Systematyki Gleb (1989) i Klasyfikacji Gleb Leśnych Polski (2000) gleby płowe (Haplic Luvisols, zgodnie z klasyfikacją FAO-UNESCO, 1989) i czterdzieści – gleby rdzawe (Haplic Cambiarenosols, zgodnie z klasyfikacją FAO-UNESCO, 1989). Dla każdego typu gleby próby pobierano w dwu oddziałach, różniących się historią użytkowania lasu. Dwadzieścia profili gleb rdzawych i tyleż samo gleb płowych (PRE) usytuowanych było w starej części rezerwatowej Białowieskiego Parku Narodowego objętej ochroną prawną od roku 1921 – oddziały 288 i 340 oraz po dwadzieścia profili gleb rdzawych i płowych na terenie przyłączonym do BPN w roku 1996, a wcześniej użytkowanym gospodarczo (AMG), z prowadzonym pozyskaniem drewna – oddziały 229 i 339. W czasie badań terenowych określono morfologię gleb, barwę poszczególnych poziomów genetycznych według skali Munsela (1973) oraz ich miąższość, którą podano jako średnią matematyczną ze 100 pomiarów. Następnie każdorazowo ze wszystkich poziomów genetycznych pobierano materiał do dalszych analiz laboratoryjnych.

2.2. Analizy laboratoryjne

W celu charakterystyki badanych gleb płowych i rdzawych dla każdego poziomu genetycznego wykonano następujące oznaczenia:

- uziarnienie (jednorazowo), dla frakcji szkieletowej i piasków metodą sit, dla frakcji drobniejszych metodą areometryczną Bouyoucos'a w modyfikacji Casagrande'a i Prószyńskiego (Dobrzański, Uziak, 1972);
- odczyn gleby (pH), potencjometrycznie z użyciem pH-meteru Hach 108;
- przewodnictwo elektryczne (EC), potencjometrycznie z użyciem konduktometru Hach 1108;
- składniki rozpuszczalne w 20% HCl, zgodnie z metodą Gedroycia (Dobrzański, Uziak, 1972), metodą ASA;
- kationy wymienne (Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, K⁺, Na⁺), po ekstrakcji gleby 1 M octanem azotu o pH 6.8, metodą ASA;
- kwasowość hydrolityczną (HH), metodą Kappena (Dobrzański, Uziak, 1972);
- wymienny wodór (EH), wymienny glin (EAl) oraz kwasowość wymienną (EA), metodą Sokołowa (Dobrzański, Uziak, 1972);

Na podstawie otrzymanych wyników obliczono również:

- sumę wymiennych kationów o charakterze zasadowym (S), jako sumę Ca⁺⁺ + Mg⁺⁺ + K⁺ + Na⁺,
- pojemność kompleksu sorpcyjnego (T), jako Hh + S,
- stopień nasycenia gleb kationami o charakterze zasadowym (V), jako S/T x 100%.

Do obliczeń zapasów węgla organicznego w badanych glebach określono:

- węgiel organiczny (TOC), metodą Alтена w poziomie organicznym i zmodyfikowaną metodą Tiurina w poziomach mineralnych,
- gęstość objętościową (GO) w próbkach o nienaruszonej strukturze pobranych do stalowych cylinderków o objętości 100 cm³,
- gęstość objętościową węgla (DC) jako iloczyn zawartości węgla organicznego i gęstości objętościowej określonej dla 1 m³ gleby (Liski, Westman, 1997; Liski, 1995),
- całkowity zapas węgla organicznego (MC) jako sumę zawartości zapasów węgla organicznego w poszczególnych organicznych i mineralnych poziomach i podpoziomach genetycznych do głębokości 1 metra.

2.3. Statystyczne opracowanie wyników

Wartości średnie i odchylenia standardowe charakteryzujące badane właściwości gleb w poszczególnych poziomach genetycznych gleb płowych i rdzawych określono na podstawie zróżnicowania wartości ich serii pomiarowych wykonanych w pokrywie glebowej ekosystemów o różnej historii użytkowania. Analizą statystyczną objęto poziomy A i Bv w przypadku gleb rdzawych oraz A, Eet i Bt w glebach lessive. Następnie na

Tab. 1. Wybrane fizyczne i chemiczne właściwości badanych gleb

Tab. 1. Some physical and chemical properties of studied soils

Poziom glebowy	BD		TOC		N		C:N		pH		EC		EA		EAL		EH	
	g.100cm ⁻³		%								mS		cmol(+) kg soil ⁻¹					
	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
<i>Haplic Luvisols – gleby płowe</i>																		
O	0,19	0,05	16,7	4,75	0,843	0,087	19,8	4,2	5,12	0,18	114,8	21,1	0,25	0,12	0,08	0,03	0,17	0,09
A	1,04	0,04	2,14	0,32	0,231	0,041	9,3	2,5	4,56	0,11	78,2	29,7	1,30	0,18	0,70	0,21	0,61	0,16
Eet	1,23	0,03	0,43	0,21	0,031	0,007	13,9	2,1	4,79	0,09	45,7	10,3	0,97	0,09	0,85	0,08	0,12	0,08
Bt	1,46	0,03	0,16	0,02	-	-	-	-	5,30	0,21	41,3	4,6	0,93	0,21	0,79	0,24	0,14	0,04
C	1,52	0,02	0,10	0,01	-	-	-	-	5,62	0,24	38,8	3,7	0,29	0,13	0,20	0,07	0,09	0,06
<i>Haplic Cambiarenosols – gleby rdzawe</i>																		
O	0,16	0,04	25,4	7,21	0,663	0,082	38,3	5,7	4,11	0,12	98,5	21,2	5,17	1,97	4,03	1,72	1,14	0,32
A	1,30	0,11	3,75	0,21	0,172	0,036	21,8	3,4	4,33	0,18	59,2	11,1	2,38	0,02	2,19	0,01	0,19	0,01
Bv	1,49	0,07	1,25	0,23	0,058	0,009	21,6	2,8	4,47	0,15	46,9	9,8	0,85	0,23	0,81	0,25	0,04	0,02
BvC	1,64	0,04	0,18	0,03	-	-	-	-	4,71	0,08	41,3	6,4	0,64	0,03	0,57	0,05	0,06	0,02
C	1,66	0,09	0,03	0,00	-	-	-	-	4,92	0,02	35,1	3,9	0,06	0,02	0,04	0,02	0,02	0,01

(mean) – wartości średnie, (std) – odchylenia standardowe,

(BD) – gęstość objętościowa - *bulk density*, (TOC) – całkowita zawartość węgla organicznego - *total organic carbon*, (N) – zawartość azotu - *nitrogen content*, (C:N) – stosunek węgla organicznego do azotu - *carbon-nitrogen ratio*, (pH_{H₂O}) – odczyn gleby - *reaction*, (EC) – przewodnictwo elektryczne - *electric conductivity*, (EA) – kwasowość wymienna - *exchangeable acidity*, (EAL) – wymienny glin - *exchangeable aluminium*, (EH) – wymienny wodór - *exchangeable hydrogen*

podstawie parametrycznych testów istotności określono statystyczną istotność różnic pomiędzy wynikami otrzymanymi dla poszczególnych typów gleb w dwu wariantach użytkowania lasu. Wynioskowanie statystyczne przeprowadzono przy 5% ryzyku błędu ($p < 0,05$).

3. Wyniki

3.1. Charakterystyka badanych gleb

Substratem, z którego wykształcone zostały gleby analizowanych ekosystemów są osady lodowcowe stadiu Warty zlodowacenia Odry. Stanowią je bazalne gliny moreny dennej, przykryte różnej miąższości piaszczystymi osadami glacyjfluwalnymi, lub piaszczystym płaszczem przemodelowanym peryglacjalnie (Kowalkowski i Borzyszkowski, 1977). To właśnie od miąższości pokryw piaszczystych zależne jest morfogenetyczne zróżnicowanie badanych gleb. W miejscach płytkiego zalegania gliny bazalnej przykrytej małej miąższości poligenetycznym utworem piaszczystym lub gliniasto-piaszczystym wykształcone są gleby płowe (Haplic Luvisols) z próchnicą typu mull, i poziomami genetycznymi: O – A – Eet – Bt – C, zaś gdy ich miąższość przekracza kilka metrów – gleby rdzawe (Haplic Cambiarenosols) z próchnicą typu moder o budowie: O – A – Bv – BvC – C.

Badane gleby płowe w górnej części profilu (poziomy próchniczny – A i luvic – Eet) wykształcone są z piasków gliniastych mocnych, zaś poziomy argillic – Bt

oraz skała macierzysta – C, z gliny lekkiej lub średniej, gdy gleby rdzawe w całym profilu z piasków słabogliniastych. Obydwa badane typy gleb charakteryzują się odczynem kwaśnym, o malejącej kwasowości w głąb profilu, przy czym gleby płowe cechują się wyższymi wartościami pH w porównaniu z glebami rdzawymi. Charakteryzują się one również statystycznie istotnie mniejszą w porównaniu z glebami rdzawymi kwasowością wymienną (EA), mniejszym udziałem wymiennego glinu (EAL), mniejszą całkowitą zawartością węgla organicznego (TOC) oraz węższym stosunkiem C:N (tab. 1).

Zawartość metalicznych kationów wymiennych w badanych glebach jest stosunkowo niska i odpowiada zaszeregowaniu: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+ > Na^+$. Niemniej jednak ich zawartość w glebach płowych jest dwu-, trzykrotnie większa w porównaniu z glebami rdzawymi. Stopień nasycenia gleb kationami o charakterze zasadowym (V) w glebach płowych jest zróżnicowany i charakteryzuje się wzrostem wartości wraz z głębokością profilu. W poziomach A i Eet waha się od 35 do 55%, gdy w poziomach Bt i C wynosi około 70%. Podobny przebieg stopnia wysycenia kompleksu sorpcyjnego kationami zasadowymi występuje w glebach rdzawych, niemniej jednak wartości V są w nich znacznie niższe w porównaniu z glebami płowymi i wynoszą odpowiednio w poziomach A i Bv do 20%, wzrastając dopiero w poziomie skały macierzystej do około 40-50%. W kom-

Tab. 2. Wybrane właściwości sorpcyjne badanych gleb

Tab. 2. Some sorption properties of studied soils

Poziom glebowy	HA		Ca ²⁺		Mg ²⁺		K ⁺		Na ⁺		S		T		V	
	cmol(+) kg soil ⁻¹														%	
	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
<i>Haplic Luvisols – gleby płowe</i>																
O	6,68	2,39	2,48	0,86	0,81	0,24	0,11	0,05	0,06	0,01	3,47	1,12	10,15	3,01	34,5	7,7
A	4,50	0,64	4,22	3,61	0,43	0,31	0,10	0,02	0,08	0,06	4,83	3,98	9,33	3,68	51,8	21,5
Eet	2,36	0,23	1,07	0,84	0,15	0,09	0,08	0,02	0,03	0,02	1,33	0,95	3,69	0,81	36,1	17,8
Bt	3,30	0,56	5,70	1,15	1,10	0,18	0,27	0,05	0,11	0,02	7,18	1,40	10,48	1,51	68,5	5,3
C	2,34	0,41	6,13	1,59	1,14	0,10	0,22	0,04	0,07	0,05	7,58	1,56	9,92	1,17	76,3	7,2
<i>Haplic Cambiarenosols – gleby rdzawe</i>																
O	19,13	3,92	1,68	0,22	0,54	0,38	0,19	0,06	0,05	0,02	2,47	0,26	21,60	4,32	11,4	5,1
A	6,15	1,28	0,77	0,46	0,16	0,11	0,10	0,03	0,04	0,01	1,07	0,49	7,22	1,48	14,8	2,5
Bv	3,26	0,27	0,53	0,41	0,09	0,04	0,06	0,02	0,03	0,01	0,71	0,34	3,96	0,35	17,8	1,8
BvC	2,65	0,73	1,33	1,08	0,41	0,36	0,07	0,06	0,04	0,02	1,86	0,78	4,50	0,81	41,2	3,6
C	1,77	0,21	1,38	0,90	0,25	0,00	0,03	0,00	0,03	0,00	1,70	0,81	3,47	0,28	48,9	4,1

(mean) – wartości średnie, (std) – odchylenia standardowe

(HA) – kwasowość hydrolityczna - *hydrolytic acidity*, (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺) – kationy wymienne - *exchangeable cations*, (S) – suma kationów zasadowych - *total exchangeable bases*, (T) pojemność sorpcyjna - *exchange capacity*, (V) – stopień nasycenia kompleksu sorpcyjnego kationami zasadowymi - *degree of base saturation*

pleksie sorpcyjnym gleb płowych, w poziomach powierzchniowych szereg sumy kationów i wodoru jest następujący S < HA, a w poziomach Bt i C odwrotny, tzn. S > HA. W glebach rdzawych we wszystkich poziomach genetycznych S < HA (tab. 2).

Na różnice żyzności pomiędzy badanymi glebami wskazuje również zawartość składników rozpuszczalnych w 20% HCl, którą przyjmuje się jako miarę zasobności siedlisk (Prusinkiewicz, Kowalkowski, 1964; Szafranek, 2000; Degórski, 2002). Uzyskane wyniki potwierdziły powszechnie znaną prawidłowość, iż naj-

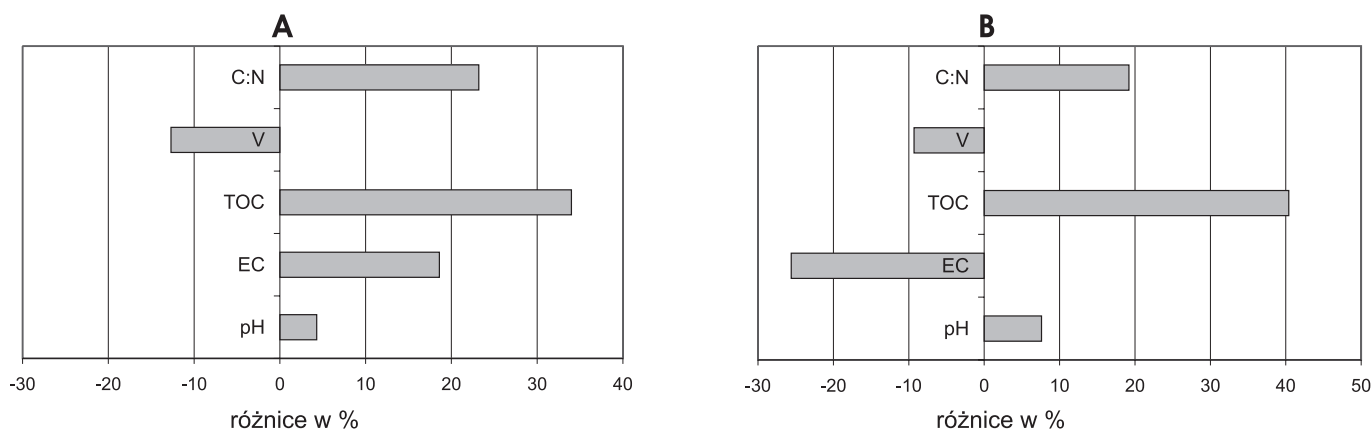
więcej składników rozpuszczalnych w 20% kwasie chłorowodorowym zawierały gleby płowe w porównaniu z glebami rdzawymi. Jedynie zawartość glinu była wyższa w glebach rdzawych w porównaniu z glebami płowymi. Analizując pionowe zróżnicowanie zawartości składników rozpuszczalnych w 20% HCl stwierdzono, iż w glebach płowych wielkość składników wyraźnie wzrastała w poziomie wmycia, co wynika z genezy poziomu Bt, będącego jednocześnie poziomem diagnostycznym argillic, jak i większej zasobności w składniki pokarmowe gliny morenowej, z której wykształcone

Tab. 3. Zawartość składników potencjalnie przyswajalnych dla roślin (ekstrahowanych 20% HCl) w badanych glebach

Tab. 3. Content of some nutrients potentially accessible to plants (extracted in 20% HCl) in studied soils

Poziom glebowy	Al ₂ O ₃		Fe ₂ O ₃		P ₂ O ₅		CaO		MgO		K ₂ O		Na ₂ O	
	cmol(+) kg soil ⁻¹													
	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
<i>Haplic Luvisols – gleby płowe</i>														
O	0,63	0,11	0,54	0,06	0,06	0,01	0,197	0,053	0,127	0,005	0,073	0,009	0,007	0,002
A	0,57	0,08	0,51	0,03	0,05	0,01	0,163	0,097	0,123	0,005	0,063	0,005	0,006	0,001
Eet	0,61	0,02	0,68	0,16	0,05	0,01	0,070	0,008	0,193	0,049	0,083	0,025	0,007	0,002
Bt	3,75	1,31	2,41	0,35	0,05	0,02	0,160	0,037	0,497	0,135	0,353	0,068	0,007	0,001
C	3,31	0,22	1,96	0,40	0,05	0,02	0,203	0,052	0,157	0,052	0,353	0,059	0,006	0,004
<i>Haplic Cambiarenosols – gleby rdzawe</i>														
O	0,81	0,06	0,41	0,04	0,08	0,03	0,147	0,034	0,077	0,033	0,057	0,005	0,011	0,001
A	0,73	0,04	0,20	0,02	0,02	0,01	0,063	0,005	0,070	0,008	0,043	0,005	0,008	0,002
Bv	1,29	0,44	0,47	0,07	0,06	0,01	0,063	0,005	0,123	0,026	0,047	0,009	0,007	0,002
BvC	2,12	0,88	0,48	0,11	0,04	0,01	0,50	0,008	0,163	0,111	0,100	0,064	0,007	0,003
C	2,78	0,31	0,90	0,18	0,02	0,01	0,43	0,005	0,123	0,062	0,120	0,099	0,008	0,005

(mean) – wartości średnie, (std) – odchylenia standardowe



Ryc. 1. Różnice pomiędzy wartościami średnimi określonymi dla właściwości poziomów próchnicznych gleb ekosystemów prawnie chronionych i użytkowanych gospodarczo

A – gleby płowe (*Haplic Luvisols*), B – gleby rdzawe (*Haplic Cambiarenosols*)

Fig. 1. Differences between mean values of some soil properties determined for soil organic/humus horizon in ecosystems after managed in relation to preserve ecosystems

A – *Haplic Luvisols*, B – *Haplic Cambiarenosols*

są poziomy Bt i C. W glebach rdzawych obserwuje się natomiast powolny spadek zawartości składników wraz z głębokością występowania poziomu genetycznego gleby, lub też ich nieznaczny wzrost zawartości w poziomie Bv (tab. 3).

3.2. Wpływ użytkowania lasu na właściwości gleb

Analiza porównawcza właściwości gleb wykonana dla ekosystemów leśnych, które do połowy lat dziewięćdziesiątych użytkowano gospodarczo prowadząc w nich trzebieże jak i zręby, w stosunku do ekosystemów od blisko 100 lat objętych ścisłą ochroną prawną wykazała, że zarówno w glebach rdzawych jak i płowych występują statystycznie istotne różnice pomiędzy wielkościami niektórych z badanych właściwości gleb. W obydwu typach gleb ekosystemów objętych działalnością gospodarczą stwierdzono o około 20% szerszy stosunek C:N w porównaniu z glebami lasów chronionych (ryc. 1). Również w glebach tych w stosunku do gleb ekosystemów objętych ochroną zaobserwowano mniejszą o około 10% wartość wskaźnika nasycenia kompleksu sorpcyjnego gleb kationami o charakterze zasadowym, co wskazywać może na mniejszą aktywność biologiczną i zasobność gleb ekosystemów, w których prowadzono gospodarkę leśną. Dowodem na mniejszą aktywność biologiczną gleb w lasach użytkowanych gospodarczo może być zanotowany szerszy stosunek C:N oraz o kilkadziesiąt procent wyższa całkowita zawartość węgla organicznego TOC. W glebach

tych stwierdzono także o kilka procent wyższą wartość indeksu pH, w stosunku do gleb ekosystemów objętych przez blisko 100 lat ochroną (ryc. 1).

Część z badanych właściwości gleb nie wykazywała statystycznie istotnych różnic pomiędzy ekosystemami o różnej formie użytkowania. Znalazły się wśród nich: zawartość jednowartościowych kationów wymiennych, czy też fosforu i potasu rozpuszczalnego w 20% HCL.

Wyodrębniła się również grupa cech glebowych o odmiennych zachowaniach w glebach płowych i rdzawych zależnie od typu użytkowania ekosystemów leśnych. Należy do niej między innymi przewodnictwo elektryczne (EC), które w glebach rdzawych ekosystemów leśnych użytkowanych gospodarczo było średnio o ponad 20% niższe od gleb ekosystemów objętych długoterminową ochroną, gdy natomiast w glebach płowych zaobserwowano odwrotne zjawisko, czyli o blisko 20% wyższe EC w glebach ekosystemów użytkowanych gospodarczo w porównaniu z glebami ekosystemów podlegającymi od wielu lat ochronie prawnej (ryc. 1).

3.3. Związek zapasów węgla organicznego w glebach z żyznością siedlisk i ich historią użytkowania

W analizowanych glebach zarówno płowych jak i rdzawych, zgodnie z ogólnymi prawidłowościami profilowego rozmieszczenia materii organicznej w glebach autogenicznych, najwięcej węgla organicznego zakumu-

lowane jest w poziomie organicznym oraz w poziomach próchnicznych mineralnej części badanych pedonów. W podpoziomach poziomu organicznego zawartość węgla organicznego (TOC) maleje wraz ze wzrostem stopnia humifikacji materiału organicznego, od 48% w podpoziomie surowinowym gleb rdzawych do około 25% w spągu podpoziomu epihumusowego. W glebach płowych zawartość węgla w poziomie organicznym wynosi od około 50% w poziomie surowinowym do 17% w butwinie. W solum dwu badanych typów gleb najwyższe wartości TOC występują w poziomie próchnicznym i zmniejszają się w głąb profilu (tab. 1). Analogicznie do pionowego zróżnicowania TOC w analizowanych profilach glebowych nawiązuje również zróżnicowanie gęstości objętościowej węgla organicznego (DC), określonej dla poszczególnych poziomów genetycznych. Najwyższe jej wartości odnotowano w poziomie organicznym gleb płowych oraz w próchnicznym i organicznym gleb rdzawych (ryc. 2).

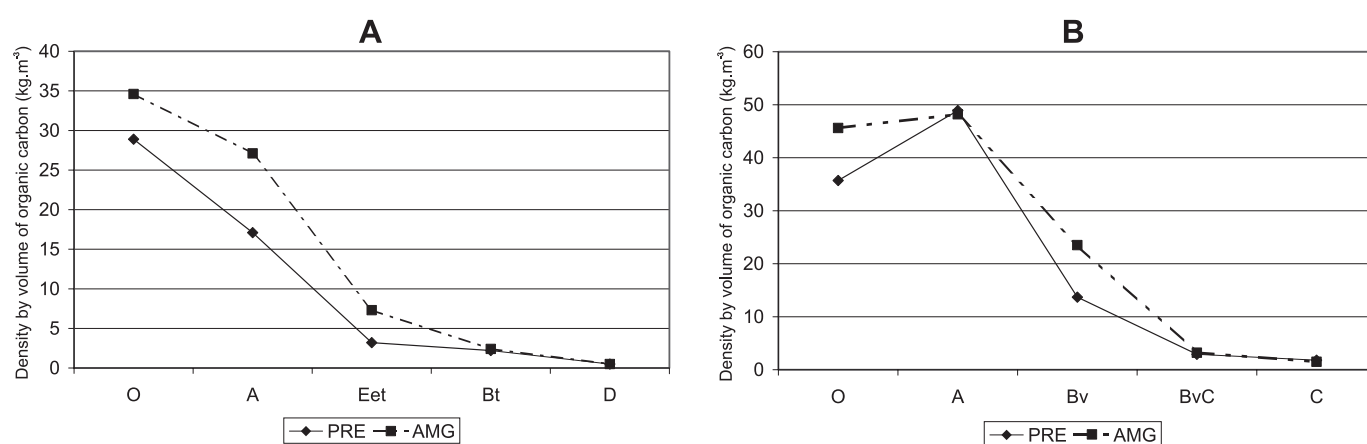
Zaobserwowano również większe wartości DC w glebach ekosystemów z prowadzoną do niedawna gospodarkę leśną w porównaniu z glebami ekosystemów będących od blisko stu lat pod prawną ochroną. Największe różnice w wartościach gęstości węgla organicznego pomiędzy analogicznymi poziomami gleb ekosystemów posiadających różną historię użytkowania stwierdzono w poziomie organicznym i próchnicznym gleb

płowych, odpowiednio $5,7 \text{ kg m}^{-3}$ i 10 kg m^{-3} oraz w poziomie organicznym i rdzawym Bv gleb rdzawych, odpowiednio $9,9 \text{ kg m}^{-3}$ i $9,8 \text{ kg m}^{-3}$ (ryc. 2).

Pionowe zróżnicowanie gęstości objętościowej węgla organicznego determinuje wielkość jego zapasów w poszczególnych poziomach genetycznych gleb (Liski, 1995; Liski, Westman 1997; Degórski, 2002). Największe zapasy węgla organicznego MC w dwu badanych typach gleb znajdują się zatem w poziomie organicznym i próchnicznym, a następnie jego wielkość zmniejsza się wraz z głębokością. Porównując całkowite zapasy węgla organicznego określone dla poziomu organicznego i mineralnej części gleby do głębokości 1 metra w dwu badanych typach gleb stwierdzono, że w glebach płowych jest on około dwukrotnie mniejszy od zapasów węgla organicznego w glebach rdzawych (ryc. 3). Analizując natomiast zapasy węgla organicznego w glebach z uwagi na różną historię użytkowania ekosystemów leśnych należy podkreślić, iż w dwu badanych typach gleb stwierdzono istotnie statystycznie mniejsze zapasy węgla organicznego w glebach ekosystemów objętych od blisko 100 lat ochroną prawną (ryc. 3).

3.4. Dyskusja uzyskanych wyników

Prowadzenie badań w siedliskach o stabilnym i zrównoważonym przebiegu procesów pedogenicznych, charakteryzujących się bardzo małym zaburzeniem antro-



Ryc. 2. Zróżnicowanie gęstości objętościowej węgla organicznego (DC) określonego dla poszczególnych poziomów genetycznych gleb płowych i rdzawych w dwu wariantach użytkowania: ochrony prawnej (PRE) i użytkowania gospodarczego (AMG)

A – gleby płowe, B – gleby rdzawe

Fig. 2. Differences in density by volume of organic carbon (DC) determined for the particular horizons of Haplic Luvisols and Haplic Cambiarenosols under preserve (PRE) and after management (AMG)

A – Haplic Luvisols, B – Haplic Cambiarenosols

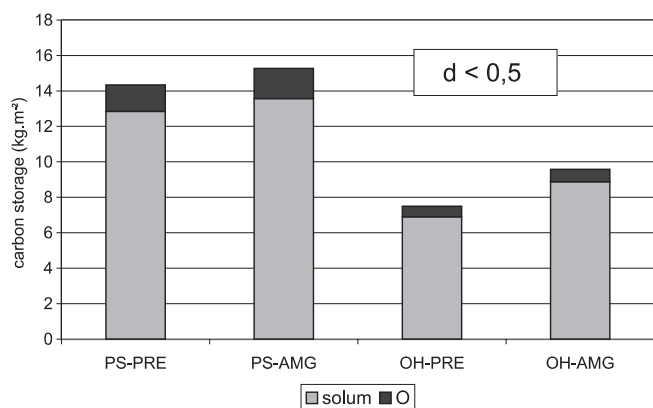
pogenicznym, umożliwia poznanie funkcjonowania ekosystemów w ich naturalnych warunkach, typowych dla stosunków hydrotermicznych i litomorfogenicznych danego regionu geograficznego. Dodatkowo, jeżeli dysponujemy danymi z serii pomiarowych obejmujących długie przekroje czasowe, to wyniki takie poza wartością poznawczą pozwalają także na ich odniesienie i porównanie z obiektami o innej historii użytkowania (np. przekształconymi antropogenicznie). Bardzo dobrym „poligonem badawczym” do tego typu analiz jest Białywieski Park Narodowy (Hedemann, 1939), którego gleby charakteryzują się bardzo małym przekształceniem w wyniku działalności człowieka, a wyraża się to między innymi poprzez niską zawartość metali ciężkich w glebach (Gworek i in., 1999), jak również poprzez bardzo małą zmienność właściwości fizyko-chemicznych w czasie kilkudziesięciu lat (Gworek i in., 2000).

Niezaburzone przez czynniki antropogeniczne przebieg procesów pedogenicznych oraz „dojrzałe” ekosystemy są szczególnie istotne w badaniach zapasu węgla w glebie, na kształtowanie się, którego wpływa wiele czynników edaficznych jak i zewnętrznych (Post i in.,

1982, 1990; Liski, Westman, 1997; Liski i in., 1997; Vucetich i in., 2000; Degórski, 2001, 2002). Wśród najważniejszych należy wymienić trofizm siedlisk, a przede wszystkim zawartość materii organicznej, odczyn gleb, wilgotność, właściwości sorpcyjne, czy też aktywność biologiczną pedonów (Parton i in., 1983; Liski, 1995).

Otrzymane wyniki potwierdziły te zależności. W siedliskach żyzniejszych fragmentacja i dekompozycja drewna, a następnie humifikacja i mineralizacja materii organicznej zachodzi znacznie szybciej niż w siedliskach ubogich w składniki pokarmowe, charakteryzujące się mniejszą aktywnością biologiczną. W glebach tych następuje mniejsza akumulacja węgla organicznego, a tym samym jego zapasy w glebie są znacznie mniejsze od gleb ekosystemów ubogich w składniki odżywcze. Określone zapasy węgla organicznego w glebach płowych były blisko dwukrotnie mniejsze w porównaniu z glebami rdzawymi. W poziomach organicznych tych gleb różnice te były jeszcze większe i wyniosły blisko 300%.

Stwierdzono również wpływ formy użytkowania lasu na zapasy węgla organicznego w glebie. W ekosystemach z kilkusetletnim drzewostanem, które od blisko 100 lat podlegają ochronie prawnej, określone zapasy węgla organicznego zarówno w glebie płowej, jak i rdzawej są blisko o 50% mniejsze w porównaniu z tymi samymi typami gleb, znajdującymi się w lasach historycznie użytkowanych gospodarczo (ryc. 3). Działalność ta wpłynęła na obniżenie żyzności siedlisk oraz ich aktywność biologiczną. Świadczą o tym stwierdzone statystycznie istotne różnice w mniejszym stopniu wysycenia kompleksu sorpcyjnego gleb kationami o charakterze zasadowym (V) czy też szerszym stosunku C:N w glebach ekosystemów leśnych użytkowanych gospodarczo w relacji do objętych ochroną prawną (ryc. 3). W glebach lasów użytkowanych gospodarczo stwierdzono również większą gęstość objętościową węgla organicznego (ryc. 3), która bezpośrednio determinowała większe zapasy węgla organicznego.



Ryc. 3. Zapasy węgla organicznego określone dla pedonu o powierzchni 1m² obejmującego poziom organiczny i mineralną część gleby (solum) do głębokości 1 metra w świerkowym borze mieszanym (PS) i grądzie (OH) w dwu wariantach użytkowania: podlegającego od blisko 100 lat ochronie prawnej (PRE) i użytkowanego gospodarczo (AMG)

Fig. 3. Carbon storage determined for the pedon about 1m² surface, contains organic horizon and mineral part (solum) to the 1 m deep in mixed pine-spruce forest (PS) and oak-hornbeam forest (OH) and two variants of use: preserve (PRE) and after management (AMG).

4. Podsumowanie

Na podstawie uzyskanych i opisanych w pracy wyników badań można stwierdzić, iż rozpatrując zapasy węgla w glebie należy mieć na uwadze wpływ wielu czynników na kształtowanie się ich wielkości. Zaprezentowane rezultaty przeprowadzonych studiów wykazały również, że czynniki te mogą być zarówno naturalne, czyli wynikać z troficzności siedlisk, jak i antropogeniczne związane z typem gospodarki leśnej prowadzonej na danym obszarze. Wykazano, że zarówno na-

turalnie uwarunkowana większa zawartość składników odżywczych w glebie, jak i działania ochronne człowieka mające na celu minimalizację jego oddziaływania na ekosystemy leśne charakteryzują się negatywnym wpływem na zapasy węgla w glebie, co oznacza, że w glebach takich zapasy węgla były mniejsze w porównaniu z glebami ekosystemów uboższych w składniki odżywcze czy też użytkowanych gospodarczo. Trzeba jednak pamiętać, że znane są z literatury inne czynniki naturalne i antropogeniczne, które wpływają dodatkowo na podnoszenie żyzności siedlisk i przyspieszenie procesu humifikacji i mineralizacji materii organicznej, a tym samym mniejszą zawartość węgla organicznego w glebie. Należy tu wymienić chociażby globalne podnoszenie się temperatury, czy też bezpośrednie nawożenie stosowane coraz częściej w lasach, jak również pośrednie poprzez przenoszenie mikro- i makroelementów do ekosystemów przez wiatr i opady atmosferyczne (Breymeyer et al., 1997). Analizując zatem kształtowanie się zapasów węgla organicznego w glebach, musimy brać pod uwagę cały kompleks czynników determinujących i regulujących jego obieg oraz akumulację w pokrywie glebowej (Harmon, Hua, 1991). Takie postępowanie pozwoli na dokładniejsze poznanie zjawisk zachodzących w ekosystemach i umożliwi wypracowanie metody powstrzymującej ubożenie zawartości węgla organicznego w glebach, a sam proces zmniejszania się zapasów węgla organicznego w pedosferze będzie dużo wolniejszy od zakładanego i prezentowanego bardzo często w scenariuszach prognoz kształtowania się bilansu węglowego w obecnym stuleciu.

5. Literatura

- Breymeyer A., Degórski M., Reed D., 1997:** *Decomposition of pine-litter organic matter and chemical properties of upper soil layers; transect studies.* Environmental Pollution 98 (3), 361-367.
- Degórski M., 2000:** *The influence of possible climate change on soil structure in Poland.* Globalnyje i regionalnyje izmienienia klimata i ich prirodnyje i socjalno-ekonomiczeskije posledstwa. GEOS, Moscow, 239-246.
- Degórski M., 2001:** *The total storage of organic carbon in the soil of pine ecosystems in Northern and Central Europe.* Abstracts. Ecol. Soc. of America, Madison, Wisconsin.
- Degórski M., 2002:** *Przestrzenna zmienność właściwości gleb bielicoziemnych środkowej i północnej Europy a geograficzne zróżnicowanie czynników pedogenicznych. (The spatial variability to the properties of podzolic soils in Central and Northern Europe and the geographical differentiation of pedogenic factors),* Prace Geogr. 182, Warszawa.
- Dobrzański B., Uziak S., 1972:** *Rozpoznawanie i analiza gleb. (Recognition and analysis of soil).* PWN, Warszawa.
- Gworek B., Degórski M., Brogowski Z., 1999:** *Trace metals in auto- and semihydrogenic soils found in three forest site types of Białowieża National Park.* Polish Journal of Environmental Studies, 8 (5): 305-308.
- Gworek B., Brogowski Z., Degórski M., Wawrzoniak J., 2000:** *Zmiany właściwości fizyko-chemicznych niektórych gleb Białowieżskiego Parku Narodowego.* Roczniki Gleb., 60(1/2): 87-99.
- Harmon M., Hua C., 1991:** *Coarse woody debris dynamics in two old-growth ecosystems.* Bioscience 41, 9: 604-610.
- Hedemann O., 1939:** *Dzieje Puszczy Białowieżskiej w Polsce przed-rozbiorowej (w okresie do 1798 roku).* Instytut Badawczy Lasów Państwowych Seria A, 41, reprint Agencja Benkowski, Białystok.
- Klasyfikacja gleb leśnych Polski, 2000:** *Opracowanie Zespołu Klasyfikacji Gleb Leśnych,* A. Kowalkowski red., Centrum Informacji Lasów Państwowych, Warszawa.
- Kowalkowski A., Borzyszkowski J., 1977:** *The role of periglacial and extraperiglacial perstructions in the formation of the soil profile in Central Europe.* Folia Quaternaria 48: 37-45.
- Lal R., 2000:** *Węgiel glebowy i nasilenie efektu cieplarnianego. (Soil carbon and global warming effect).* Rolnictwo polskie i ochrona jakości wody. Zeszyty Edukacyjne 6: 22-36.
- Lawton J., 2000:** *Biodiversity, ecosystem processes and climate change. Ecology achievement and challenge.* Blackwell Science: 139-160.
- Liski J., 1995:** *Variation in Soil Organic Carbon and thickness of soil horizons within a boreal forest stand – effect of trees and implications for sampling.* Silva Fennica 29(4): 255-266.
- Liski J., Westman C., 1997:** *Carbon storage in forest soil of Finland. Effect of thermoclimate.* Biogeochemistry 36: 239-260.
- Liski J., Ilvesniemi H., Makela A., Starr M., 1997:** *Effect of soil age, forest fires and harvesting on the storage of organic carbon in podzolizing boreal forest soil. Carbon storage of forest soils in Finland.* Academic dissertation, Part V, Helsinki, 1-25.
- Maser C., Trappe R., (eds.) 1984:** *The seen and unseen world of the fallen.* Gen. Tech. Report PNW-164, USDA Forest Service, Pacific Northwest, Portland, Oregon, 59.
- Maser C., Tarrant R., Trappe J., Franklin J., (eds.) 1988:** *From the forest to the sea: a story of fallen trees.* Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-229., USDA For. Serv., Portland Oregon, 153.
- Parton W., Anderson D., Cole C., Stewart J., 1983:** *Simulation of soil organic matter formations and mineralization,* [w:] Lowrance R., Todd R., red. Nutrient cycling in ecosystems. Univ. of Ga. Collage of Agriculture, Special Publication 23: 533-550.
- Post W., Emanuel W., Zinke P., Stangenbauer A., 1982:** *Soil carbon pools and world life zones.* Nature 298: 156-159.
- Post W., Peng T., Emanuel W., King A., Dale V., De Angelis D., 1990:** *The global carbon cycle.* Am. Sci. 78: 310-326.

- Prusinkiewicz Z., Kowalkowski A., 1964:** *Studia gleboznawcze w Białowieckim Parku Narodowym*. Roczn. Gleb. 14(2), 161-304.
- Spears J., Lajtha K., 2001:** *Coarse woody debris may influence soil chemistry and direct pedogenesis towards podzolization in the Oregon Cascades*. Abstracts. Ecol. Soc. of America, Madison, Wisconsin, 210.
- Szafranek A., 2000:** *Właściwości oraz przydatność rolnicza gleb pławowych i rdzawych Wysoczyzny Kąkuszyńskiej. (Properties and agricultural usefulness of lessive and rusty soils on Kąkuszyn Plateau)*. Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Vucetich, J., Reed D., Breymeyer A., Degórski M., Mroz G., Solon J., Roo-Zielinska E., Noble. R., 2000:** *Carbon pools and ecosystem properties along a latitudinal gradient in northern Scots pine (Pinus Syvestris) forests*. Forest Ecology and Management 136: 135-145.
- Wolski J., 2003:** *Martwe drewno w lesie: ocena i propozycja postępowania (Down dead wood in the forest: quantification and proposals for handling)*. Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa 953: 23-45.

INFLUENCE OF FOREST MANAGEMENT INTO THE CARBON STORAGE IN SOIL

Summary

A great part of the global reserve of carbon is accumulated in the soils of forested terrestrial ecosystems. In the face of ongoing civilisational processes leading to rapid changes in properties of elements of the natural environment, the carbon balance is of ever greater strategic significance to socioeconomic development. Alongside the natural factors influencing the shaping of carbon storage in soils, an ever greater role is being played by anthropogenic processes. The aim of the paper has been to determine the influence of trophic status, and management on the organic carbon storage in the soils of mixed pine-spruce forest with rusty soil and oak-hornbeam forest with lessive soil. The research was carried out in Białowieża National Park, Poland. The results obtained point to the negative influence of habitat fertility on the organic carbon storage in soil. Also indicated is the influence of forest cutting in lowering natural soil fertility, which is to say increased carbon storage in the soils of ecosystems subject to management, as opposed to that in forests under protection for a decade now.