

Natalia DOVYDENKO*

ZAWARTOŚĆ WĘGLA W GLEBACH WYBRANYCH DRZEWOSTANÓW SOSNOWYCH I ŚWIERKOWYCH NA GRUNTACH POROLNYCH

CONTENTS OF CARBON IN SOIL OF SELECTED PINE AND SPRUCE STANDS
OCCURRING ON POST-AGRICULTURAL LANDS

***Abstract.** The aim of the study was to define contents of carbon in soil of pine and spruce stands of different age in post-agricultural lands as well as on soil designed to afforestation. Two phases of carbon sequestration were found: (1) decrease of carbon contents after planting (emission) due to soil preparation, and (2) accumulation of carbon during subsequent growth period. Carbon contents in soil of spruce stands were larger than those of pine. A difference in contents of carbon inside of planting line and between them was found and they were decreasing in the age of stands. Generally, the highest carbon level was found in the north than in the south Poland. An attempt to determine the whole carbon contents in forest soil on post-agricultural lands was made.*

***Key words:** carbon, soil, pine and spruce stands, post-agricultural lands, planting line.*

* Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Ekologii i Ochrony Środowiska, Sękocin Las, 05-090 Raszyn; adres korespondencyjny: Instytut Leśny Białoruskiej Akademii Nauk, Homel, Białoruś, email: dovydenn@lenta.ru

1. WSTĘP

Gromadzenie węgla i jego przepływ w biosferze, w związku z prawdopodobnymi zmianami klimatu, jest zagadnieniem o dużym znaczeniu dla ochrony środowiska, problematyki ekonomicznej i społecznej (Sedjo 1992; Dixon 1994; Climate Change 1996, Land use, land-use change, and forestry 2000). Świadczy o tym wiele międzynarodowych dokumentów, m.in. Ramowa Konwencja o Zmianach Klimatycznych (1992) oraz ustanowiony przez strony konwencji Protokół z Kyoto (1998). Ten ostatni dokument zawiera zobowiązania polskiego rządu do poprawy bilansu i redukcji emisji o 6% w stosunku do roku bazowego 1988. We wszystkich dokumentach lasy są wymieniane jako źródło zmian globalnych w przypadku wylesień i emisji „gazów szklarniowych”, a jednocześnie jako szansa zmniejszenia tych zmian w wyniku asymilacji i gromadzenia węgla w swoich strukturach. Gromadzenie węgla w biomase nadziemnej lasu jest w znacznym stopniu rozpoznane, brak natomiast dostatecznych informacji o zasobach i mechanizmach gromadzenia węgla w glebie leśnej (Bajrazharya i in. 1998). Ponieważ możliwości zwiększania retencji tkwią głównie w zalesieniach, tzn. w zmianach sposobu użytkowania gruntów, badaniami objęto zalesione grunty porolne z drzewostanami w różnym wieku.

2. CEL I HIPOTEZY ROBOCZE

Celem podjętych badań było:

1) określenie zawartości węgla w zalesionych glebach porolnych pod drzewostanami sosnowymi i świerkowymi w różnym wieku oraz w glebach przeznaczonych do zalesień;

2) oszacowanie zawartości węgla w glebach drzewostanów na gruntach porolnych zalesionych w odniesieniu do wybranych terenów Regionalnych Dyrekcji Lasów Państwowych oraz krain przyrodniczo-leśnych;

3) oszacowanie zawartości węgla w glebach leśnych dla wybranych obszarów Polski;

4) określenie wpływu przygotowania gleby do zalesień na zawartość węgla w wybranych drzewostanach na gruntach porolnych (wariant „rzędy” i „między rzędami”);

5) próba uogólnienia przebiegu akumulacji węgla w glebie na przykładzie wybranego nadleśnictwa.

Hipoteza główna:

Zalesienie gruntów porolnych powoduje gromadzenie się węgla w glebie, a jego pula wzrasta z wiekiem drzewostanów.

Hipotezy pomocnicze:

1) na zawartość węgla w glebie ma wpływ położenie geograficzne, które kształtuje lokalne warunki klimatyczne: na półkuli północnej zawartość węgla w glebie jest większa na północy i maleje w kierunku południowym;

2) istnieje różnica w zawartości węgla w glebie w drzewostanach na gruntach porolnych powstałych z sadzenia: zawartość węgla w rzędach jest niższa niż w międzyrzędach.

3. METODYKA BADAŃ

3.1. Metodyka wyboru obiektów badawczych

Znaczny obszar drzewostanów na gruntach porolnych i ich stosunkowo duże zróżnicowanie spowodowało konieczność starannego wyboru reprezentatywnej próby do badań. Przyjęto wstępne założenia: badaniami będą objęte drzewostany iglaste położone na obszarach nizinnych, próba powinna reprezentować co najmniej 80% ich powierzchni oraz 80% ich masy (grubizny) z uwzględnieniem siedlisk i klas wieku. W wybranych oraz regionalnych dyrekcjach Lasów Państwowych wytypowano do badań drzewostany sosnowe i świerkowe na gruntach porolnych, określając typ siedliskowy lasu jako bór świeży lub bór mieszany świeży. Były to drzewostany do IIIa klasy wieku (do 50 lat) oraz najstarsze drzewostany na gruntach porolnych w danym nadleśnictwie. Wyniki badań w najstarszych drzewostanach miały posłużyć do określenia zawartości węgla w glebie pod koniec pierwszego pokolenia drzew na gruntach porolnych.

Na podstawie danych otrzymanych z Biura Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej oraz posługując się metodą skumulowanego procentu ustalono, że pod względem zajmowanej powierzchni dostateczną reprezentację drzewostanów iglastych na gruntach porolnych w Polsce stanowią drzewostany w regionalnych dyrekcjach LP w Szczecinku, Olsztynie, Szczecinie, Pile, Gdańsku, Poznaniu i Toruniu (ryc. 1).

Szczegóły tych obliczeń można wyrazić następującymi równaniami:

$$P = \sum (P_1 \div P_i)$$

gdzie:

P – sumowana powierzchnia (lub masa)

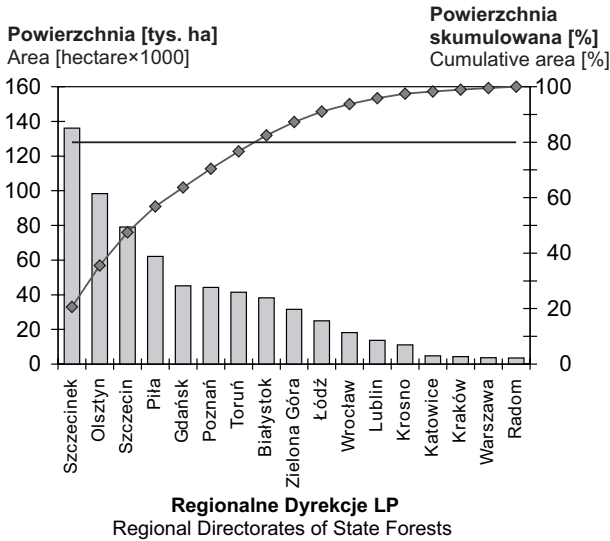
$\sum (P_1 \div P_i)$ – suma indywidualnych powierzchni (lub mas) $P_1, P_2 \dots P_i$. Jeżeli $i = n$, to P – powierzchnia (lub masa) całkowita.

$$Ni = \frac{\sum P_1 : P_i}{\sum P_1 : P_n} 100\%$$

gdzie:

Ni – bieżący skumulowany procent powierzchni (lub masy).

Tą samą procedurę zastosowano dla klas wieku oraz typów siedlisk.



Ryc. 1. Powierzchnia drzewostanów iglastych na gruntach porolnych w poszczególnych Regionalnych Dyrekcjach Lasów Państwowych oraz skumulowany procent tej powierzchni w Polsce
 Fig. 1. The area of coniferous stands on post-agricultural lands according to Regional Directorate of State Forests, and cumulative percentage of that area in Poland

Analiza warunków przyrodniczych wybranych w powyższy sposób obszarów wykazała, że nie obejmują one ważnych różnicowań geograficznych występujących w Polsce. Zdecydowano się zatem przeprowadzić badania również w następujących dyrekcjach: Lublin (kraina Mazowiecko-Podlaska), Łódź (kraina Małopolska oraz Mazowiecko-Podlaska), Zielona Góra (kraina Wielkopolsko-Pomorska), Toruń (kraina Wielkopolsko-Pomorska) i Białystok (kraina Mazursko-Podlaska).

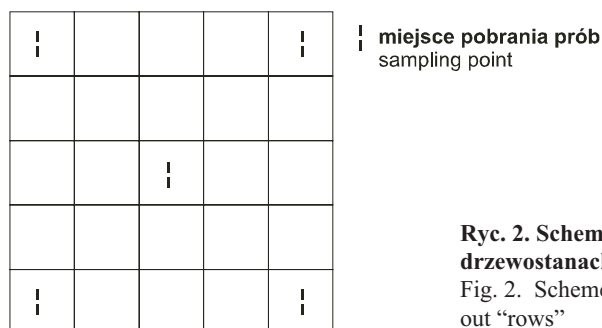
Do badań wybrano nadleśnictwa, w których na zwartym obszarze o jednakowym typie gleby występowały drzewostany możliwie wszystkich przyjętych do badań klas wieku. W nadleśnictwach Babki, Giżycko, Lubichowo, Łobez, Mirosławiec, Nidzica i Tuchola wybrano po dwa obiekty badawcze z drzewostanami sosnowymi, które spełniały przyjęte warunki. W ten sposób do pobierania próbek glebowych wytypowano łącznie 26 obiektów badawczych, położonych w 15 nadleśnictwach, 11 regionalnych dyrekcjach LP, 5 krainach przyrodniczo-lesnych. Spośród nich 22 były z drzewostanami sosnowymi, a 4 – z drzewostanami świerkowymi.

Równoległe do badań gleb pod drzewostanami prowadzono analizy zawartości węgla w glebach przeznaczonych do zalesień. Do tych badań wybrano w poszczególnych nadleśnictwach gleby tego samego typu co pod drzewostanem, na powierzchni położonej w możliwie bezpośrednim sąsiedztwie drzewostanów powstałych z zalesień. Wyniki tych analiz pozwoliły na określenie początkowej zawartości węgla, czyli w momencie zmiany sposobu użytkowania gruntu (klasa wieku "0").

3.2. Metoda pobierania próbek glebowych i analizy chemiczne

Próbki glebowe pobierano w wybranych obiektach badawczych zgodnie z przyjętą metodyką, tzn. w drzewostanach wyznaczono kwadrat o boku 5 m (ryc. 2)

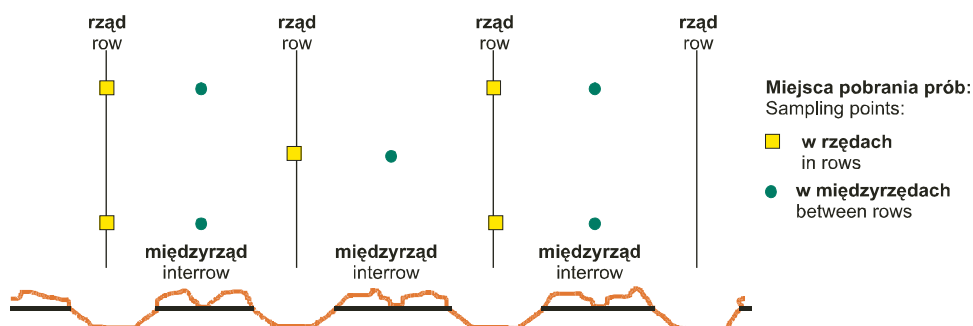
i w 5 punktach położonych na przekątnych kwadratu pobrano po dwie próbki: jedną o nienaruszonej strukturze, do oznaczania gęstości objętościowej, pobierano przy użyciu cylinderka o objętości 100 cm^3 , drugą do analiz chemicznych w celu oznaczania zawartości węgla. Próbki pobrano z wierzchniej warstwy gleby mineralnej o miąższości 10 cm.



Ryc. 2. Schemat pobierania próbek glebowych w drzewostanach bez widocznych rzędów sadzenia
Fig. 2. Scheme of soil sampling in the forest without "rows"

Wszędzie tam, gdzie możliwe było wyróżnienie w drzewostanach (Ia–IIb podklasy wieku) rzędów i międzyrzędów, zdecydowano się na pobieranie próbek gleby oddzielnie z tych właśnie miejsc w celu oszacowania wielkości zróżnicowania. Jedną z czynności wykonywanych przy zalesianiu gruntów porolnych jest bowiem odsłonięcie gleby mineralnej przez wyoranie bruzd – rzędów, i przemieszczenie warstwy próchnicznej z rzędów do międzyrzędów, co może prowadzić do zróżnicowania zawartości węgla w glebie w początkowym okresie po założeniu uprawy. Taki sposób pobierania próbek glebowych, zastosowano w nadleśnictwach Babki, Giżycko, Gostynin, Lubichowo, Łobez, Mirosławiec, Parczew, Piotrków Tryb., Sobibór i Tuchola, przy czym próbki pobierano parami: pierwsza próbka pobierana była w rzędzie, a druga z najbliższego miejsca między rzędami. Odległość pomiędzy miejscami pobrania próbek nie przekraczała 60 cm (ryc. 3).

Łącznie pobrano 2539 próbek, w tym 1070 z drzewostanów sosnowych i 195 z drzewostanów świerkowych. Zawartość węgla oznaczono w dwóch powtórze-



Ryc. 3. Schemat pobierania próbek glebowych w drzewostanach o wyraźnych rzędach sadzenia
Fig. 3. Scheme of soil sampling in planted stands with distinct planting rows

niach. Próbkę były analizowane w Pracowni Chemii Środowiska Leśnego w Instytucie Badawczym Leśnictwa.

3.3. Metody statystyczne

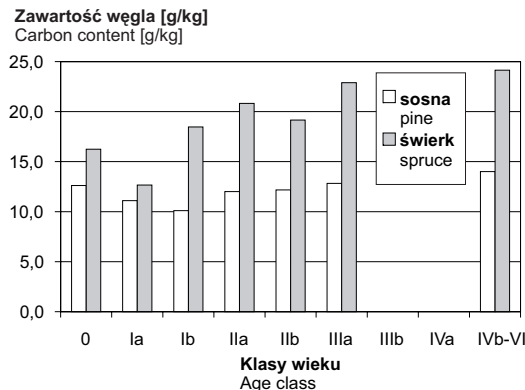
Przy opracowywaniu danych zastosowano następujące miary i metody statystyczne: odchylenie standardowe, analiza wariancji, nieliniowa regresja, test Tukey'a, test Duncana. Ze względu na założenia analizy wariancji wszystkie analizy wykonano stosując logarytmiczną transformację danych.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. Zawartość węgla w glebie drzewostanów sosnowych i świerkowych

Zarówno w drzewostanach sosnowych, jak i świerkowych w pierwszej fazie po zalesieniu następowało na ogół zmniejszenie zawartości węgla w glebie. W drzewostanach sosnowych proces taki trwał do Ib podklasy wieku. W starszych drzewostanach natomiast na ogół miało miejsce zwiększanie się zawartości węgla (ryc. 4).

Analiza wariancji danych dla drzewostanów sosnowych i świerkowych pozwala potwierdzić powyższe spostrzeżenia i tym samym główną hipotezę badań, mówiącą, że w całym okresie wzrostu drzewostanów zwiększa się zawartość węgla w glebach na gruntach porolnych. Statystyczna istotność różnic zaznacza się silniej w przypadku badania różnic testem Duncana niż Tukey'a. Test Duncana wykazuje ponadto niejednorodność tego procesu. Zarejestrowano istotne statystycznie zmniejszenie się transformowanych logarytmicznie zawartości węgla w podklasie



Ryc. 4. Uśrednione dane empiryczne zawartości węgla w glebie w drzewostanach sosnowych i świerkowych na gruntach porolnych (łącznie dla wszystkich nadleśnictw)

Fig. 4. Average contents of carbon in soil of pine and spruce stands on post-agricultural lands in relation to age classes

Ib (1,119167) w stosunku do terenów przeznaczonych do zalesień (1,174826), co potwierdza obserwowana na rycinie 4 dwufazowość procesu gromadzenia się węgla w glebie. Test ten potwierdza podobny związek dla drzewostanów świerkowych.

Porównanie zawartości węgla w glebie według gatunków i wieku drzewostanów wskazuje, że gleby w drzewostanach świerkowych gromadziły w każdej podklasie wieku więcej węgla niż gleby w drzewostanach sosnowych (ryc. 4).

4.2. Zmiany zawartości węgla w glebie w pierwszym okresie po zalesieniu

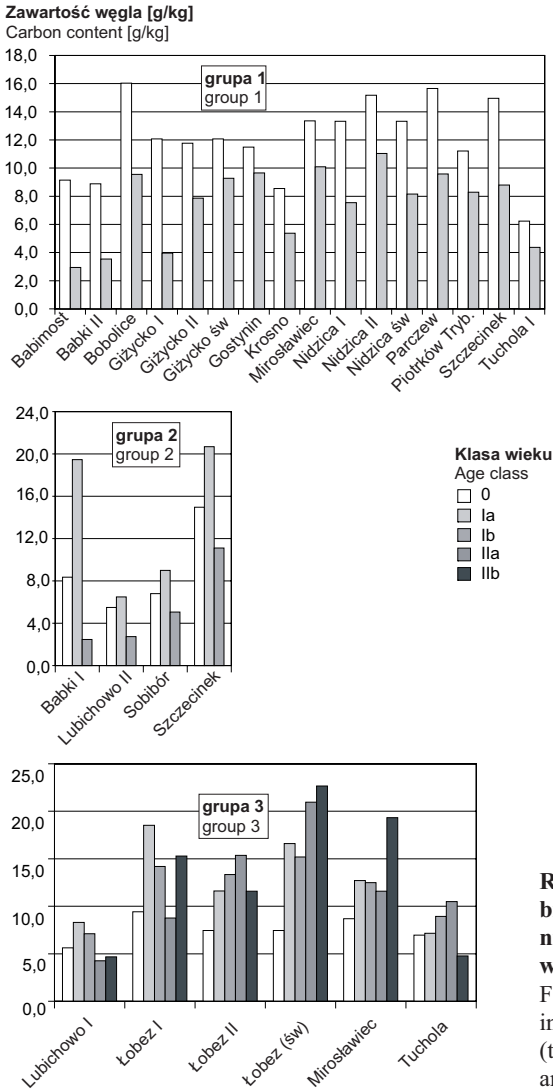
Analiza zawartości węgla w badanych glebach pozwoliła na rozróżnienie 3 grup obiektów badawczych w zależności od kształtowania się zawartości węgla w pierwszych latach po zalesieniu, tzn. w Ia i Ib podklasach wieku, w stosunku do gruntu niezalesionego, niezależnie od gatunku drzewostanu (ryc. 5):

- grupa 1: zawartość węgla zmniejsza się w drzewostanie Ia podklasy wieku;
- grupa 2: zawartość węgla najpierw zwiększa się, po czym maleje do poziomu poniżej zawartości węgla w glebie przed zalesieniem;
- grupa 3: bez wyraźnych tendencji.

W grupie 1 znalazło się 16 badanych obiektów (ryc. 5), a dwuczynnikowa analiza wariancji wykazała, że mniejsza zawartość węgla w glebie po zalesieniu nie jest przypadkowa. Istotny również okazał się wpływ lokalizacji obiektu badawczego, tzn. położenia geograficznego (co wynika ze statystycznie istotnego współdziałania zmniejszania się zawartości węgla z obiektem badawczym).

Do grupy 2 zaliczono 4 obiekty badawcze (nadleśnictwa). Zarejestrowany wzrost zawartości węgla w podklasie Ia okazał się istotny w dwóch obiektach – Babki I i Szczecinek, w dwóch pozostałych (Lubichowo II i Sobibór) różnice nie były statystycznie istotne. Ważna dla rozpatrywanych zagadnień wydaje się być różnica między zawartością węgla w glebie przed zalesieniem i po zalesieniu, po osiągnięciu przez drzewostan Ib klasy wieku, tzn. spadek zawartości węgla w glebie pod drzewostanem w wieku do 20 lat. Spadek ten okazał się nieistotny jedynie w nadleśnictwie Sobibór.

Do grupy 3 zaliczono 6 obiektów badawczych: Mirosławiec I, Łobez (Łobez I, Łobez II i Łobez (św)), Lubichowo I, Tuchola I. Dwuczynnikowa analiza wariancji wykazała wprawdzie istotność oddziaływania na zawartość węgla w glebie zarówno wieku drzewostanów, jak i ich położenia (obiekty badawcze/nadleśnictwo), ale zmienność wyników utrudnia ich interpretację. Wpływ wieku drzewostanów nie był tak jednoznaczny, jak ich położenie, co potwierdza brak wyraźnej prawidłowości w kształtowaniu się zawartości węgla w glebie w tej grupie obiektów badawczych. Z uwagi na duże rozproszenie wyników w tej grupie obiektów badawczych dalsza interpretacja współdziałania położenia i wieku drzewostanów jest utrudniona.



Ryc. 5. Średnia zawartość węgla w glebie przed (klasa wieku 0) i po zalesieniu, łącznie w drzewostanach sosnowych i świerkowych

Fig. 5. Average contents of carbon in soil of pine and of spruce stands (together) before (age class 0) and after afforestation

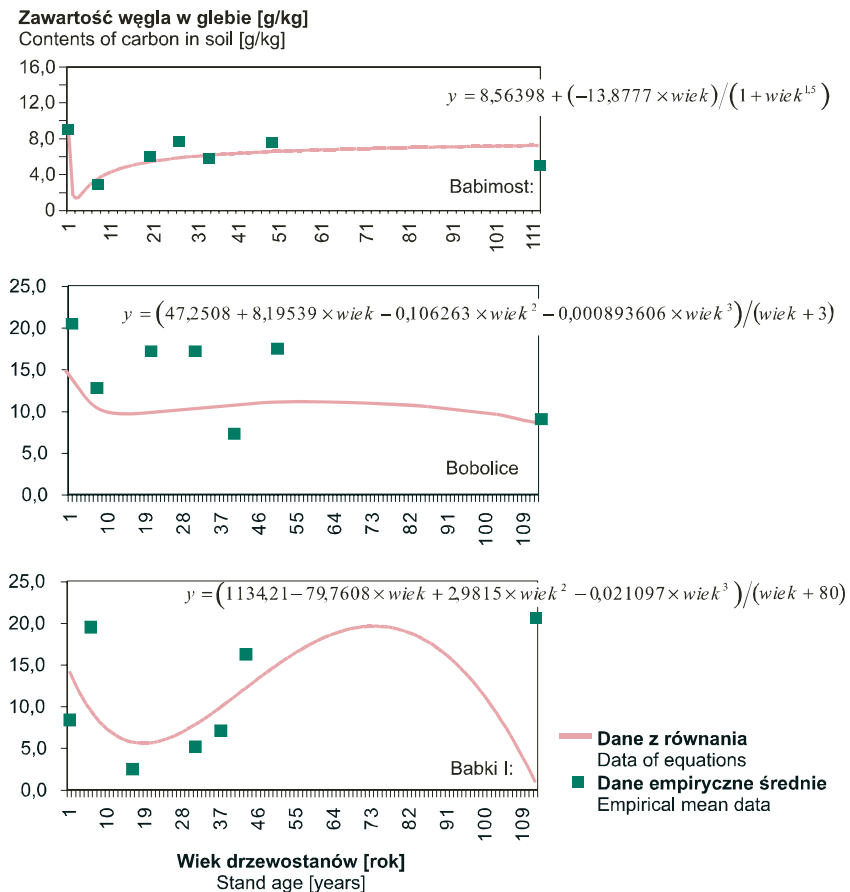
4.3. Zawartość węgla w glebie jako funkcja wieku drzewostanów na gruntach porolnych (klasy wieku „0”–IIIa)

Założenie, że gromadzenie węgla w glebie w drzewostanach na gruntach porolnych jest funkcją czasu, tzn. funkcją wieku tych drzewostanów, zobowiązuje do zbadania prawidłowości stwierdzonych w poprzednich analizach jako zależności funkcyjnej. W tym celu zastosowano regresję krzywoliniową, która opisuje przebieg zmian zawartości węgla w glebie w drzewostanach sosnowych i świerkowych w zależności od rzeczywistego wieku drzewostanu (w klasach wieku od „0” do najstarszych). Dla każdego obiektu badawczego wyznaczono współczyn-

niki regresji (a_1, a_2, a_3, a_4, a_5) oraz określono poziom współczynnika determinacji (R^2), który jest miarą dokładności „dopasowania” funkcji do danych empirycznych. Wykresy przedstawiają interpretację graficzną wyznaczonych funkcji. Analiza wykresów wykazała, że można je pogrupować w trzy typy przebiegu zawartości węgla w glebie drzewostanów sosnowych i świerkowych (ryc. 6).

Pierwszy typ (a) określono jako przebieg dwufazowy: zawartość węgla w glebie po zalesieniu zmniejsza się, a następnie wzrasta wraz z wiekiem drzewostanów (ryc. 6 na przykładzie obiektu badawczego Babimost). Do tego typu należy 14 następujących obiektów badawczych: Babimost, Babki II, Giżycko I, Giżycko II, Giżycko (świerk), Krosno, Lubichowo II, Łobez (świerk), Mirosławiec II, Nidzica I, Nidzica II, Nidzica (świerk), Szczecinek (świerk), Tuchola I.

Drugi typ (b) opisuje zmniejszanie się zawartości węgla w glebie po zalesieniu i utrzymywanie się niskiej zawartości tego pierwiastka w glebie w trakcie wzrostu



Ryc. 6. Przebieg zawartości węgla w glebie drzewostanów sosnowych w zależności od wieku wg funkcji regresji nieliniowej

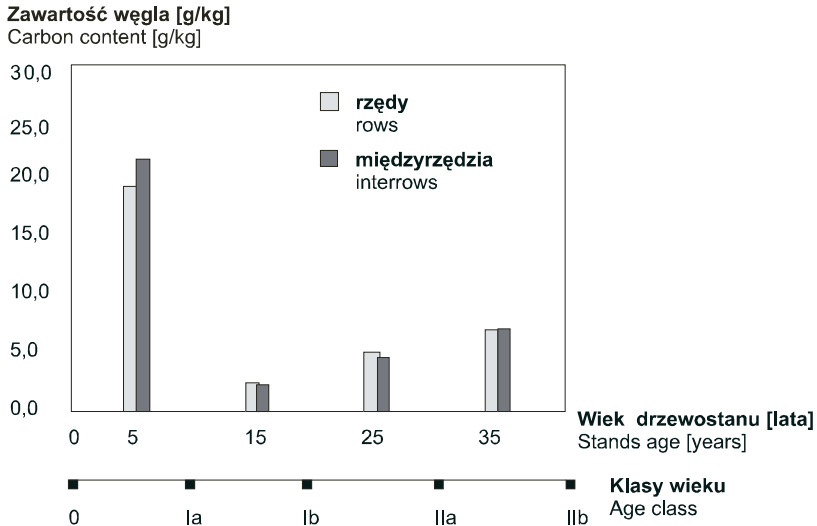
Fig. 6. Changes of the contents of carbon in soil of pine stands depending on age according to function a nonlinear regression

drzewostanów (ryc. 6, na przykładzie nadleśnictwa Bobolice). Do tego typu należało 5 następujących obiektów badawczych (nadleśnictw): Bobolice, Gostynin, Parczew, Piotrków Trybunalski oraz Sobibór.

Trzeci typ (c) opisuje nieregularny (fluktuacyjny) przebieg gromadzenia się węgla w glebach gruntów porolnych po zalesieniu (ryc. 6, na przykładzie Babki I). Do tego typu należą obiekty: Babki I, Lubichowo I, Łobez I, Łobez II, Mirosławiec I, Szczecinek, Tuchola II. Na tle całej tej grupy Łobez II i Mirosławiec I wyróżniają się wyjątkową regularnością przebiegu gromadzenia się węgla i pod tym względem można byłoby zakwalifikować te obiekty do typu a. W obiektach tych jednakże nie zarejestrowano początkowego spadku zawartości węgla w pierwszych latach po posadzeniu.

4.4. Zawartość węgla w glebie w rzędach i w międzyrzędach

Zawartość węgla w glebie kształtowała się w sposób zróżnicowany, przy czym największe różnice były w drzewostanach Ia klasy wieku, tzn. w wieku uprawy. W starszych drzewostanach różnice te wyrównywały się (ryc. 7). Analiza wariancji nie potwierdziła istotności obserwowanych różnic między zawartością węgla w rzędach i w międzyrzędach.



Ryc. 7. Zawartości węgla w glebie w rzędach i w międzyrzędach w drzewostanach sosnowych w obiekcie badawczym Babki I

Fig. 7. The comparison of the carbon contents in soil of planting lines and between them in pine stands in Babki I

4.5. Porównanie zawartości węgla w glebie między obiektami badawczymi (niezależnie od wieku drzewostanów)

Jednoczynnikowa analiza wariancji wykazała istotne zróżnicowanie zawartości węgla w glebie w drzewostanach sosnowych między obiektami badawczymi. Najwięcej węgla w glebie drzewostanów sosnowych na gruntach porolnych stwierdzono w nadleśnictwie Szczecinek (średnio 16,52 g/kg gleby), przy czym ilość ta nie różniła się istotnie od zawartości węgla w następujących obiektach badawczych: Giżycko II, Łobez I, Łobez II, Mirosławiec I, Mirosławiec II, Nidzica I i Nidzica II. Wymienione obiekty badawcze tworzą jednorodną grupę o najwyższych wartościach kumulacji węgla w glebie.

Najmniej węgla stwierdzono w obiekcie Lubichowo I (średnio 6,10 g/kg gleby, tzn. prawie 3-krotnie mniej niż w Szczecinku) i obiekt ten wraz z 8 innymi (od których nie różni się statystycznie istotnie), tzn. z Babimostem, Gostyninem, Krosnem, Lubichowem II, Piotrkowem Trybunalskim, Sobiborem, Tucholą I i Tucholą II, tworzy jednorodną grupę obiektów o najmniejszej kumulacji węgla w glebie w drzewostanach sosnowych na gruntach porolnych.

Pośrednią grupę stanowią: Babki I, Babki II, Bobolice, Giżycko I i Parczew.

W badaniach nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic zawartości węgla w glebie w drzewostanach świerkowych.

4.6. Zawartość węgla w glebie w drzewostanach sosnowych według krain przyrodniczo-leśnych

Analiza wariancji wykazała istotne zróżnicowanie zawartości węgla w analizowanych typach gleb w zależności od położenia geograficznego. Najwięcej węgla kumulują gleby porolne w krainie Mazursko-Podlaskiej (średnio 12,99 g/kg gleby) oraz krainie Bałtyckiej (średnio 12,91 g/kg gleby) i krainy te nie różnią się między sobą w sposób istotny. Najmniej węgla w glebach przyjętych do badań znajdowało się w krainie Małopolskiej, reprezentowanej jednakże jedynie przez jeden obiekt badawczy – Piotrków Trybunalski. Zdecydowanie mniej węgla zanotowano również w krainie Wielkopolsko-Pomorskiej. Pośrednią pozycję zajmuje kraina Mazowiecko-Podlaska, która różni się istotnie pod tym względem od pozostałych

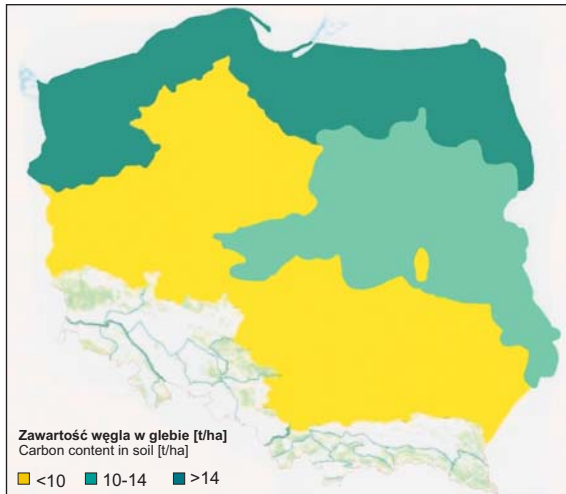
Różnice w zawartości węgla w glebach w drzewostanach sosnowych w badanych obiektach ilustruje ryc. 8, która przedstawia 3 grupy krain przyrodniczo-leśnych:

I – krainy: Bałtycka, Mazowiecko-Podlaska;

II – kraina Mazowiecko-Podlaska;

III – krainy: Wielkopolsko-Pomorska, Małopolska.

Grupy te są z dużym prawdopodobieństwem jednorodne pod względem średniej zawartości węgla w glebie na gruntach porolnych pod drzewostanami sosnowymi (zawartość węgla wyrażono w t/ha). Zawartość węgla w glebach północnej części Polski wynosi powyżej 14,0 t/ha, a w części południowej poniżej 10,0 t/ha (ryc. 8).



**Ryc. 8. Grupy krain przyrodniczo-
leśnych pod względem średnich za-
wartości węgla w glebie (t/ha) na
gruntach porolnych drzewostanów
sosnowych**

Fig. 8. The ecological forest regions grouped after the average contents of carbon in soil (ton/hectare) on post-agricultural lands with pine stands

4.7. Orientacyjna zawartość węgla w glebie w drzewostanach na gruntach porolnych dla badanych obszarów

W niniejszej pracy podjęto próbę określenia zawartości węgla za pomocą funkcji regresji na bazie danych empirycznych odnoszących się do górnej warstwy gleby o miąższości 10 cm. Określona zawartość węgla w glebie może być traktowana jako orientacyjna.

Ponieważ dane dotyczące powierzchniowej struktury klas wieku drzewostanów powstałych na gruntach porolnych odnoszą się do obszarów lasów własności skarbu państwa, będących pod zarządem regionalnych dyrekcji Lasów Państwowych (RDLP), obliczenia wykonano na podstawie danych RDLP.

W celu określenia jednorodnych grup RDLP, dla których średnie zawartości węgla w glebie nie różnią się istotnie, przeprowadzono jednoczynnikową analizę wariancji.

Analiza ta pozwoliła wyodrębnić trzy grupy regionalnych dyrekcji Lasów Państwowych:

- 1 – Gdańsk;
- 2 – Lublin, Poznań, Toruń, Łódź, Zielona Góra;
- 3 – Szczecin, Olsztyn, Białystok, Szczecinek, Piła.

Następnie dla każdej podklasy wieku i każdej z wyżej wyodrębnionych grup obliczono średnią zawartość węgla na 1 ha i określono granice ufności dla tej średniej. Iloczyn średniej zawartości C na 1 ha i powierzchni drzewostanów danej podklasy wieku oznacza orientacyjną zawartość węgla w glebie określonych drzewostanów na terenie danej regionalnej dyrekcji. Suma tych wartości dla wszystkich klas wieku daje szacowany poziom zawartości węgla dla regionalnej dyrekcji LP.

Orientacyjna zawartość węgla w glebie, wyliczona z empirycznych danych dla 11 regionalnych dyrekcji LP, na łącznej powierzchni 556831,13 ha wynosi 8,5 mln ton.

5. PRÓBA UOGÓLNIENIA

Zmiany zawartości węgla w glebach porolnych w wyniku zalesień są rezultatem dwóch procesów:

1) procesu ubywania węgla, który może być opisany przy użyciu dowolnej funkcji malejącej, w zakresie wartości dodatnich. Najprostszą taką funkcją jest prosta, przy ograniczeniu jej dziedziny do zakresu od zera do jej miejsca zerowego. Innymi możliwymi funkcjami są: hiperbola lub funkcja wykładnicza;

2) procesu przybywania węgla, który może być opisany przy użyciu funkcji rosnącej asymptotycznie do asymptoty poziomej w dziedzinie od zera do nieskończoności. Najprostszą taką funkcją jest hiperbola. Inną bardziej skomplikowaną funkcją może być krzywa logistyczna lub inne funkcje wzrostu posiadające punkt przegięcia.

Względna regularność przedstawionych powyżej przebiegów gromadzenia węgla w glebie uzasadnia próbę budowy matematycznego opisu tego zjawiska, co zrobiono na przykładzie nadleśnictwa Nidzica.

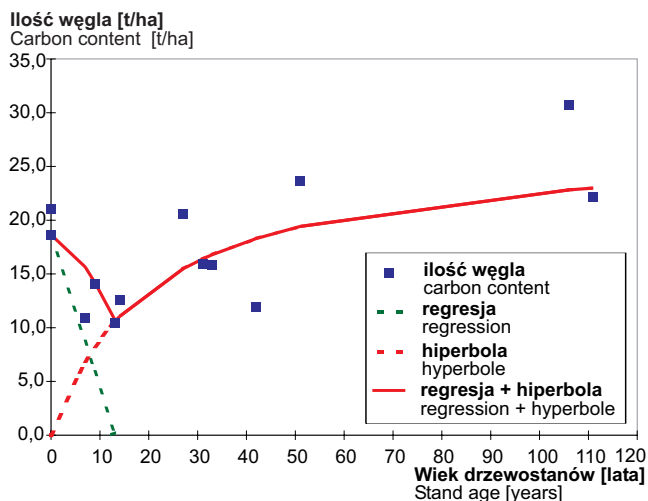
Proces przybywania węgla w glebie może być opisany przy użyciu hiperboli przechodzącej przez początek układu współrzędnych o ogólnym wzorze:

$$Y = \frac{X}{AX + B}$$

Równanie to poprzez zamianę zmiennych: $x = \frac{1}{X}$ oraz $y = \frac{1}{Y}$, po wykonaniu elementarnych przekształceń, daje się sprowadzić do postaci równania prostej:

$$y = A + Bx$$

Przykład dopasowania krzywych teoretycznych na przykładzie Nadleśnictwa Nidzica przedstawiono na rycinie 9.



Ryc. 9. Dane empiryczne i teoretyczny przebieg akumulacji węgla w glebach pod drzewostanami sosnowym założonymi na gruntach porolnych w Nadleśnictwie Nidzica

Fig. 9. The empirical data and the theoretical concept of carbon accumulation in soil in pine stands on post-agricultural lands (on the base of date from Nidzica Forest district administration)

Uzyskane wyniki porównuje się do danych z literatury przedmiotu. W pracy Yanai i in. (2000) opisany jest przebieg gromadzenia materii organicznej w glebie leśnej w cyklu produkcji od zrębu do wieku 120 lat. Przedstawiony tam przebieg krzywej jest analogiczny do otrzymanych tutaj wyników: po wykonaniu zrębu i odnowieniu ma miejsce silny spadek zawartości materii organicznej, po czym następuje powolna akumulacja.

Obydwie prace, realizowane równolegle w czasie, ale w innych warunkach i dotyczące nieco innych zagadnień, dotykają wspólnej problematyki i wzajemnie potwierdzają uzyskane wyniki.

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Otrzymane wyniki potwierdziły postawioną w pracy główną hipotezę o ogólnym wzroście zawartości węgla w glebie wraz z wiekiem drzewostanów powstałych w wyniku zalesień gruntów porolnych. Wzrost ten jednak nie przebiega równomiernie. Przy dużej zmienności wyników zebrane dowody wskazują na dominującą, ogólną prawidłowość, która polega na dwufazowym procesie kształtowania się zawartości węgla w badanych glebach: w pierwszej fazie po zalesieniu następuje zmniejszanie się zawartości, czyli uwalnianie węgla, w drugiej zaś – jego gromadzenie. Fazy te mogą być przesunięte w czasie i różnie kształtować się w zależności od wielu czynników, z których tylko niektóre uwzględniono w tych badaniach. Pomimo przyjętych metod selekcji obiektów badawczych i starań o ich porównywalność, obszary objęte badaniami cechowały się dużym mikro zróżnicowaniem glebowo-siedliskowym, zróżnicowaniem klimatycznym, zakresem zrealizowanych w przeszłości zabiegów i terminem ich wykonania, stanami bieżącej pogody, jak również innymi czynnikami, kształtującymi zarówno emisję, jak i gromadzenie się węgla w glebie. Wszystkie te czynniki były trudne do identyfikacji i uwzględnienia w zbyt krótkim okresie realizacji programu badawczego.

Dwufazowość procesu gromadzenia węgla nie zależy od gatunku drzewostanu. Drzewostany świerkowe każdej podklasy wieku gromadziły więcej węgla niż drzewostany sosnowe, a różnica ta zwiększała się wraz z wiekiem drzewostanów.

Naruszenie pokrywy gleby i jej naturalnej struktury (wyorywanie bruzd), prowadzi do przyspieszenia procesów rozkładu materii organicznej, co przyczynia się do szybkiego utleniania węgla zawartego w wierzchnich warstwach. Ujawnia się to zwiększoną emisją węgla do atmosfery. Wprawdzie po ok. 20 latach następuje wyrównanie zawartości węgla w rzędach i w międzyrzędach, ale rezygnacja z intensywnego przygotowania gleby przed zalesieniem zwiększyłaby ogólną ilość gromadzonego węgla w glebach zalesionych gruntów porolnych.

Zawartość węgla w glebie była największa na północy kraju (Szczecinek) i zmniejszała się w kierunku południowym. Test wyodrębnił trzy grupy krain przy-

rodniczoleśnych, wyznaczając jednocześnie gradient z północy na południe zmniejszającej się zawartości węgla w badanych glebach.

Średnia zawartość węgla w glebie w drzewostanach poszczególnych klas wieku posłużyła do obliczenia orientacyjnej zawartości węgla w glebie zalesionych gruntów porolnych wybranych regionalnych dyrekcji Lasów Państwowych. Orientacyjna zawartość węgla w glebie takich drzewostanów w badanych rdLP wynosi ok. 8,5 mln ton węgla.

Średnia zawartość węgla w glebie drzewostanów świerkowych jest wyższa od średniej zawartości węgla w glebie w drzewostanach sosnowych. Różnice są prawdopodobnie spowodowane warunkami wzrostu drzewostanów: w przypadku drzewostanów świerkowych wyższa na ogół była wilgotność gleby, żyzność, zawartość materii organicznej, itp.

W drzewostanach w wieku ok. 30–40 lat może nastąpić spadek zawartości węgla w glebie. Zjawisko to można wiązać z cięciami pielęgnacyjnymi wykonywanymi w tym wieku w drzewostanach na gruntach porolnych (czyszczenia, trzebieże, itp.).

Proces ubywania opisano za pomocą prostej malejącej – funkcji liniowej, ograniczając jej dziedzinę od zera do jej miejsca zerowego; proces przybywania węgla przedstawiono w postaci funkcji rosnącej – hiperboli przechodzącej przez początek układu współrzędnych. Obydwie funkcje tworzą prosty model sekwestracji węgla w glebach na gruntach porolnych w wyniku zalesień, przy tradycyjnej technice przygotowania gleby.

Równania regresji, które charakteryzują przebieg zawartości węgla w glebie, umożliwiają prognozowanie zawartości węgla w drzewostanach spełniających podobne warunki. Temu samemu służy teoretyczne uogólnienie zjawiska opracowane na podstawie funkcji ubywania i przybywania.

Zawartość węgla w rzędach i w międzyrzędach wyrównuje się wraz ze wzrostem drzewostanów. Przy przygotowywaniu gleby do zalesień poprzez wyorywanie bruzd następuje przemieszczanie się próchnicznej warstwy gleby z rzędów do międzyrzędów, co może powodować zmniejszenie ilości węgla w glebie w strefie najbliższej sadzonek i przyspieszać ogólną emisję węgla do atmosfery.

Badania wyodrębniły trzy grupy krain przyrodniczoleśnych, wyznaczając gradient malejącej zawartości węgla w glebach zalesionych gruntów porolnych z północy na południe. Odpowiada to gradientowi coraz łagodniejszych warunków klimatycznych: od strefy o wpływach subborealnych do warunków strefy umiarkowanej.

Gleba leśna jest miejscem względnie stałej sekwestracji węgla z atmosfery, a unikanie intensywnej uprawy gleby i jej ochrona przed uszkodzeniami w trakcie leśnych operacji, jak również prowadzenie umiarkowanych zabiegów pielęgnacyjnych, może przyczynić się do zwiększenia zawartości tego pierwiastka w glebach drzewostanów na gruntach porolnych.

W tym kontekście, przy formułowaniu programu dla gospodarki leśnej w związku z zobowiązaniami wynikającymi z Protokołu z Kyoto, należy zwery-

fikować dotychczasowe technologie zalesień. Operacje zalesiania mogą bowiem powodować zamiast redukcji – wzrost koncentracji CO₂ w atmosferze.

Badania ujawniły dużą zmienność procesów emisji węgla w pierwszej fazie jak i akumulacji węgla w drugiej fazie wzrostu drzewostanów. W celu kolejnego przybliżenia oceny zawartości węgla w glebach leśnych w Polsce konieczna jest kontynuacja badań oraz objęcie nimi nowych terenów i zwiększenie ilości prób dla drzewostanów reprezentujących wszystkie typy lasów w Polsce. Umożliwi to dalsze uogólnienie zjawiska i opracowanie modelu akumulacji węgla w drzewostanach mogącego mieć zastosowanie do obliczania zmian zawartości węgla w glebach w wyniku zalesień.

Praca została złożona 22.05.2003 r. i przyjęta przez Komitet Redakcyjny 2.02.2004 r.

CONTENTS OF CARBON IN SOIL OF SELECTED PINE AND SPRUCE STANDS OCCURRING ON POST-AGRICULTURAL LANDS

Summary

Carbon content in forest soil and its prediction after afforestation has presented a considerable interest for forestry in recent years. The paper is among the first to provide data on soil carbon contents before and after afforestation of post-agricultural lands with pine and spruce.

The research was performed in coniferous stands occurring on the flat terrain. In the production forestry associations involved we selected pine and spruce stands growing on post-agricultural lands. The physical type is characterized by fresh coniferous forest and fresh mixed coniferous forest. It was found that the stands selected were 1 to 50 years of age and older. In the pine stands occurring in Babki, Giżycko, Lubichowo, Łobez, Mirosławiec, Nidzica and Tuchola sylvicultural enterprises we selected two sample areas which fitted the above requirements.

In 1 to 40-year-old stands occurring in Babki, Giżycko, Gostynin, Lubichowo, Łobez, Mirosławiec, Parczew, Piotrków Tryb., Sobibór and Tuchola soil samples were withdrawn from the rows and spaces between the rows.

Thus for the research we selected 26 sample areas, including 22 sample areas in pine stands and 4 ones in spruce stands, in 15 sylvicultural enterprises in 11 production forestry associations located in 5 natural forest regions.

The current research is based on the data obtained in 1998–1999.

Carbon contents in the Ia age class pine- and spruce-stand soils were 10.30 gC/kg and 11.96 gC/kg, respectively and ran as high as 12.54 gC/kg and 23.26 gC/kg as the stands aged.

Three groups of sample areas were differentiated in relation to the peculiarities of carbon accumulation in the soil within the first years after afforestation. In the first group the mean carbon content in the Ia age class stand soil was 7.5 gC/kg, whereas that in the “0” age class stand soil was 12.08 gC/kg. Regarding the second group, the mean carbon content in the “0” age class stand soil was 8.9 gC/kg, that in the Ia age class stand soil ran as high as 13.91 gC/kg and that in the Ib age class stand soil fell to 5.34 gC/kg. Typical of the third group was a gradual increase in the carbon content from 7.65 gC/kg in the “0” age class stand soil to 13.05 gC/kg in the IIb age class stand soil.

In the Ia age class pine stands the mean carbon content in the soil of the space between the rows was 11.18 gC/kg, while that in the I Ib age class pine stands was equal to 10.08 gC/kg. The mean carbon content in the Ia and I Ib spruce-stand soils were 15.58 gC/kg and 22.9 gC/kg, respectively.

The mean carbon content in the soil of Bałtycka and Mazursko-Podlaska natural forest regions is 12.91 gC/kg and 12.99 gC/kg, respectively, that in the soil of Mazowiecko-Podlaska natural forest region is 10.49 gC/kg; the mean carbon content in the soil of Wielkopolsko-Pomorska and Małopolska natural forest regions is 9.00 gC/kg and 7.40 gC/kg, respectively.

The estimated carbon content in soils in the pine stands on post-agricultural lands covering 556,8 thousand hectares is about 8.5 million tons.

The conclusions made are as follows.

Carbon contents in soil in pine and spruce stands occurring on post-agricultural lands generally increase with the age of a stand, but the process of accumulation presents two phases: the first – carbon emissions from the soil into the atmosphere due to technology of soil preparation, and the second – carbon accumulation in the soil in the course of aging of stands. The mean carbon content in spruce-stand soils is higher than that in pine-stand ones.

The regression equation, which describes carbon contents in soil, could predict carbon contents in stands occurring in similar conditions. The theoretical justification of this phenomenon, described by the decreasing and increasing functions, could serve this purpose as well.

Carbon contents in rows and inter-row spacing level off as stand ages. When the soil is prepared for forestation by the furrow plowing method the humus layer moves from the rows into the inter-row spacing, with a consequent decrease in the amount of carbon in the soil around samplings and acceleration of carbon emission into the atmosphere.

Three groups of natural forest regions in Poland have been differentiated. It was revealed that the carbon gradient in soils in the stands occurring on post-agricultural lands decreases north-to-south. This matches the climatic gradient varying from subboreal toward Temperate Zone.

Forest soils could be an effective sink sequestering carbon from the atmosphere but they should be protected and undisturbed during soil preparation prior to afforestation. In this connection the afforestation/regeneration technologies used at the moment should be revised. The available technologies of soil preparation may lead to an increase in the CO₂ concentration in the atmosphere and not to its decrease.

Further investigations should be made in other territories in Poland and the number of soil samples withdrawn from all the Polish forest types should be increased to obtain more accurate estimates of carbon contents in forest soils. This can be help in showing a more accurate pattern of the phenomena and developing models of carbon accumulation in the soil in stands occurring on post-agricultural lands.

LITERATURA

- Bajracharya R. M., Lal R. and Kimble J. M. 1998: Soil organic carbon distribution in aggregates and primary particle fractions as influenced by erosion phases and landscape position [W:] Soil Processes and the Carbon Cycle. CRC Press., 353–367.
- Convention on Climate Change. 1999: Published for the Climate Change Secretariat by UNEP's Information Unit for Conventions (IUC). 30 p.

- Dixon R. K., Brown S., Houghton R. A., Solomon A. M., Trexler M. C., Wisniewski J. 1994: Carbon pools and flux of global forest ecosystems, *Science*, 263: 185–190.
- Climate Change 1995. 1996: *The Science of Climate Change* (eds: J. T. Houghton, L.G. Meira Filho, B.A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg and K. Maskel). Cambridge University Press, Cambridge, 572 pp.
- Land use, land-use change, and forestry. 2000: A special report of the IPCC (eds: R. T. Watson, I. R. Noble, B. Bolin, N.H. Ravindranath, D. J. Verardo, D. J. Dokken). Cambridge University Press, 377 p.
- The Kyoto Protocol to the Convention on Climate Change. 1999: Published for the Climate Change Secretariat with the support of UNEP. Information Unit For Conventions. 34 p.
- Yanai R. D., Arthur M. A., Siccama T. G. and Federer C. A. 2000: Challenges of measuring forest floor organic matter dynamics: repeated measure from a chronosequence. *Forest Ecology and Management*, 138, 1/3: 273–283.