

Marcin Pietrzykowski, Jarosław Socha*, Wojciech Krzaklewski**

PERSPEKTYWY POZYSKANIA ENERGII Z BIOMASY DRZEWOSTANÓW NA ZREKULTYWOWANYM ZWAŁOWISKU ZEWNĘTRZNYM KWB „BEŁCHATÓW”**

1. Wstęp, cel i zakres badań

W ostatnim czasie jednym z ważniejszych problemów w naukach o środowisku przyrodniczym jest Globalny efekt ocieplenia klimatu powodowany emisją gazów cieplarnianych (GHGs) związany z działalnością antropogeniczną. Z tego powodu ważna jest również ocena i rozpoznanie możliwości obniżenia emisji CO₂ i zwiększenia sekwestracji węgla w ekosystemach [22]. Wyrazem takich działań są postanowienia ramowej Konwencji ds. Zmian Klimatu narodów Zjednoczonych (UNFCCC) i wdrożenie Protokołu Kyoto [5]. Zgodnie z tym protokołem, w pierwotnych założeniach emisja gazów cieplarnianych do roku 2012 miała być zredukowana średnio o 5,2% w stosunku do poziomu 1990 r. Zadania te są realizowane w UE poprzez wprowadzanie energooszczędnych technologii i zwiększanie udziału odnawialnych źródeł energii. Lokalnie dotyczyć to może również zrekultywowanych i zalesionych terenów przemysłowych, których powstawanie jest nieodłączną konsekwencją zapotrzebowania cywilizacyjnego na kopalne źródła energii. Zgodnie z prawodawstwem krajów UE, USA, Australii, tereny pogórnice i zdegradowane podlegają rekultywacji. W Polsce powierzchnię terenów zajętych przez przemysł wydobywczy oraz energetyczny szacuje się na ok. 70 tys. ha, z tego do tej pory około 25 000 ha zrekultywowano i przekazano do zagospodarowania [14]. Większość tych terenów (ponad 60%, tj. ok. 15 tys. ha) w warunkach polskich jest zrekultywowana dla leśnictwa. Wprowadzone zalesienie, a następnie powstające ekosystemy leśne stanowią ważny element w restytucji środowiska i krajobrazu.

* Wydział Leśny, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

** Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007–2009 jako projekt badawczy w ramach grantu N 309 013 32 /2076, Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego RP

W nowoczesnej rekultywacji, obejmującej całokształt działań zmierzających do odtworzenia całych ekosystemów i krajobrazu [4, 13], aktualnie istnieje również potrzeba projektowania i rozpoznania możliwości wykorzystania rekultywowanych terenów pogórnicych dla produkcji biomasy dla celów energetycznych [6], oraz ich wpływu na sekwestrację węgla [21].

Określenie biomasy zbiorowisk i przyrostu drzewostanów jest jednym z elementów oceny efektów rekultywacji leśnej. Ma to znaczenie zarówno w aspekcie ekologicznym, dla określenia produktywności ekosystemu, jak i ekonomicznym. Znajomość stanu biomasy umożliwia między innymi opisanie bilansu energetycznego rekultywacji jako jednego z najnowszych kryteriów ekologiczno-ekonomicznych oceny efektów rekultywacji [20]. Akumulacja energii i zawartość węgla w biomasy poszczególnych komponentów biocenozy pozwala scharakteryzować jej organizację poprzez redukcję podstawowego zróżnicowania do pojedynczej jednostki, tj. dżula (J), bądź grama (g) [12]. Ilość wyprodukowanej biomasy lub wbudowanego węgla odpowiada ilości związanej chemicznie energii w procesie fotosyntezy, a równoważnik wynosi w przybliżeniu od 17 do 21 kJ \times 1g⁻¹ suchej masy. Zależy to od różnic wynikających ze składu chemicznego biomasy, np. zawartości lipidów, ale dla materiału roślinnego, zawierającego niewielkie ilości białka, a przede wszystkim poli- i oligosacharydy przyjmuje się równoważnik 20 kJ \times 1g⁻¹ suchej masy [12, 29]. Zgodnie z istniejącą praktyką możliwe jest dość dokładne określenie stanu biomasy drzewostanów na podstawie pomiarów dendrometrycznych oraz wzorów empirycznych [26]. Dotychczasowe badania wykazują zadowalające przyrosty drzewostanów na zrekultywowanych terenach pogórnicych w porównaniu do naturalnych siedlisk dla drzew leśnych [9, 11, 19]. Jednym z podstawowych gatunków wprowadzanych w zalesieniach na terenach pogórnicych w warunkach Europy Centralnej jest sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.) [3]. Gatunek ten cechuje się nadzwyczajną zdolnością przystosowania do siedlisk ubogich [7, 16].

W pracy przedstawiono praktyczne formuły matematyczne dla obliczeń biomasy drzew oraz wyniki oceny stanu biomasy drzewostanów sosnowych wprowadzonych na wierzchowinę zwałowiska zewnętrznego KWB „Bełchatów” oraz oceniono zróżnicowanie potencjalnych możliwości pozyskania energii z biomasy.

2. Obiekt badań i metodyka

Badania prowadzono na wierzchowinie zwałowiska zewnętrznego nadkładu odkrywkowej kopalni węgla brunatnego KWB „Bełchatów” (N 51 13.196; E 19 25.569). Zwałowisko ma wysokość względną od 120 do 180 m i zajmuje obszar 1480 ha, w tym zbocza (skarpy i półki) zajmują powierzchnię 1165 ha, a wierzchowina 318 ha. Klimat tego obszaru ma charakter przejściowy o dużej zmienności wywołanej ścieraniem się mas powietrza polarnomorskiego oraz polarno kontynentalnego. Średnia temperatura roczna wynosi 7,6°C, amplituda roczna 21°C, długość okresu wegetacyjnego 200–210 dnia, a suma opadów 580÷600 mm [30]. Obiekt zbudowany jest głównie z przemieszanych czwartorzędowych

piasków i piasków ze żwirami, wśród których pojawiają się miejscami mułki, gliny zwałowe i ropy oraz pławowo trzeciorzędowe utwory piaszczyste z mułkami i ropy, często zawęglone i zasiarzone. Przed wapnowaniem zawęglone utwory trzeciorzędowe wykazują właściwości fitotoksyczne i są nazywane w literaturze „pogórnymi glebami siarkowymi” [10]. Zabiegi rekultywacyjne na wierzchołku zwałowiska obejmowały: nawożenie mineralne NPK (w ilości N — 60, P — 70 i K — 60 kg ha⁻¹), wysiew nasion mieszanki traw oraz roślin motylkowych (50÷60 kg ha⁻¹). Utwory kwaśne były poddane wcześniej neutralizacji z zastosowaniem kredy jeziornej, przemieszanej w powierzchniowej warstwie do głębokości 40 cm. Następnie wprowadzano zalesienia, głównie sosną zwyczajną (*Pinus sylvestris* L.) w udziale ok. 60% i brzozę brodawkowatą (*Betula pendula* Roth) w udziale ok. 20%. Sadzonki sosny, głównie 2-letni materiał sadzeniowy, wysadzano w więźbie 0,7 × 1,5 m [15].

Powierzchnie badawcze (kwadraty 10 × 10 m) zlokalizowano w kilkunastoletnich (12–19 lat) drzewostanach sosnowych na wierzchołku zwałowiska po 4 powtórzenia w dwóch wariantach: 1 — na potencjalnie żyznych czwartorzędowych piaskach gliniastych (symbol umowny dla wariantu CzPG) oraz 2 — na trzeciorzędowych piaskach kwaśnych po neutralizacji (TPK). Powierzchnię porównawczą (P) założono na terenach lasów gospodarczych w przyległym do zwałowiska w 19-letnim drzewostanie sosnowym, na optymalnym dla tego gatunku siedlisku boru mieszanego świeżego (BMśw). Na powierzchniach wykonano pomiary dendrometryczne drzewostanów: średnicę drzew w szyi korzeniowej i na wysokości 1,3 m (pierśnicę) oraz wysokość drzew (H). Następnie wybrano drzewa próbne (35 sztuk) reprezentujące cały zakres grubości, które ścięto. Biomasa drzew próbnych określono przez ważenie całego drzewa, gałęzi oraz próby mieszanej pobranej z aparatu asymilacyjnego. Ponadto pobrano próbki aparatu asymilacyjnego w celu oznaczenia zawartości wody i węgla w laboratorium. Wodę oznaczono metodą suszarkowo-wagową (materiał suszono w temperaturze 65°C), a węgiel (C) oznaczono na aparacie Leco CNS 2000 metodą spalania i detekcji w podczerwieni (FT-IR). Na podstawie pomiarów i uzyskanych danych opracowano wzory empiryczne na określenie biomasy nadziemnej drzew i systemów korzeniowych w warunkach zwałowiska. W celu opisanie zależności biomasy poszczególnych elementów drzewa (cech, Bcecha) od grubości i wysokości zastosowano podstawowe równanie funkcji allometrycznej [23] o postaci (1):

$$B_{cecha} = a \cdot D_0^b \quad (1)$$

Parametry równania szacowano trzema sposobami:

- 1) linearyzowano powyższą zależność przez logarytmowanie;
- 2) stosowano regresję nieliniową z funkcją straty najmniejszych kwadratów;
- 3) zastosowano ważoną regresję nieliniową, w której w funkcji straty wagą była odwrotność kwadratu grubości u podstawy drzewa (D_0).

Najlepiej dopasowane równania zostały wybrane na podstawie skorygowanego współczynnika determinacji [1, 25] i średniego błędu kwadratowego (RMSE) [27]. Współlinio-

wość zmiennych oceniono na podstawie współczynnika inflacji wariancji VIF [8]. Opracowane wzory allometryczne zastosowano następnie do określenia biomasy dla poszczególnych powierzchni próbnych co pozwoliło w konsekwencji na obliczenie wielkości biomasy i sumy energii w przeliczeniu na jednostkę powierzchni dla dwóch potencjalnych wariantów żyzności siedlisk.

Do statystycznej analizy wyników oznaczeń nadziemnej biomasy drzewostanów oraz przyrostu przeciętnego rocznego (stosunek biomasy nadziemnej drzewostanów/wiek drzewostanów) zastosowano program statystyczny Statistica 8.1 [28]. Hipotezy badawcze testowano na poziomie istotności $p < 0,05$.

3. Omówienie wyników i dyskusja

3.1. Testowanie wzorów dla opisu biomasy drzewostanów

W celu opisanie zależności biomasy drzewa od pozostałych cech biometrycznych, jako zmienne wyjaśniające rozpatrywano: grubość u podstawy, pierśnicę oraz wysokość drzewa. Przy opracowywaniu wzorów poszukiwano optymalnego sposobu szacowania parametrów. Najlepsze wyniki, pod względem zastosowanych miar dopasowania i rozkładu wartości resztowych, uzyskano stosując ważoną metodę najmniejszych kwadratów. Wzór opisujący suchą masę nadziemnej części drzewa (2) wyjaśnia 96,7% zmienności tej cechy ($R = 0,98$):

$$B_{drz} = 0,102080 \cdot (D_{1,3}^2 H)^{0,793199} \quad (2)$$

gdzie:

- B_{drz} — całkowita biomasa drzewa (sucha masa), kg;
- $D_{1,3}$ — grubość drzewa na wysokości 1,3 m (pierśnica), cm;
- H — wysokość drzewa, m.

Podobnie jak w przypadku nadziemnej części drzewa, w przypadku biomasy aparatu asymilacyjnego, lepsze dopasowanie uzyskano stosując wzór empiryczny, w którym zmienną wyjaśniającą jest pierśnica, a nie grubość u podstawy drzewa (3):

$$B_i = 0,0533 \cdot (D_{1,3}^2 H)^{0,5306} \quad (3)$$

gdzie:

- B_i — biomasa igliwia (sucha masa), kg;
- $D_{1,3}$ — grubość drzewa na wysokości 1,3 m (pierśnica), cm;
- H — wysokość drzewa, m.

3.2. Wielkość i dystrybucja biomasy w drzewostanach

Biomasa nadziemna drzewostanów w wariancie 1 (CzPG) wynosiła średnio $44,24 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$, a w wariancie 2 (TPK) średnio $8,12 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Różnice te były związane nie tylko z warunkami

mi siedliskowymi ale również znacząco z wiekiem i fazą rozwojową drzewostanów sosnowych. Jak dotąd sosna w wieku 17 lat na piaskach gliniastych i glinach czwartorzędowych w wariantcie 1 (CzPG) uzyskała ponad 1,5-krotnie niższą biomasa niż sosna w wieku 19 lat na powierzchni kontrolnej na siedlisku BMśw (tab. 1). Podawana z literatury dotyczącej terenów rekultywowanych w Polsce biomasa drzewostanów sosnowych w wieku 17 lat na wyrobisku popiaskowym „Szczakowa” (Górnośląski Okręg Przemysłowy) była znacznie niższa i wynosiła $25 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ [18]. W warunkach naturalnych na niżu polskim biomasa drzewostanów sosnowych w I klasie wieku (do 20 lat) może wynosić średnio $50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, ale już w następnej klasie wieku zwiększa się prawie dwukrotnie [17]. Niektóre dane literaturowe podają biomasa nadziemną drzewostanów w lasach umiarkowanej strefy klimatycznej $21 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (drzewostany około 30-letnie) i $170 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (drzewostany 50-letnie) [12]. W porównaniu z tymi danymi, jak dotąd, biomasa drzewostanów na badanym zwałowisku w wariantcie 1 na piaskach gliniastych i glinach, choć osiągnęła wielkości niższe od drzewostanów na wybranej powierzchni kontrolnej, to ogólnie niewiele odbiegała od wielkości przeciętnych podawanych dla drzewostanów sosnowych w warunkach naturalnych. Z innych badań wynika, że przyrost biomasy drzewostanów sosnowych na gruntach rekultywowanych (wyniki z Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego) może być bardzo dynamiczny [9]. Trzeba jednak podkreślić, że dostępne dane z terenów rekultywowanych odnoszą się w większości do pierwszych generacji drzewostanów (I i II klasa wieku). Aktualnie trudno jest przewidzieć czy przy intensywnym przyroście biomasy nadziemnej dynamika obiegu biogenów na siedliskach pogórnicych będzie wystarczająca dla procesu żywienia mineralnego drzewostanów i powstaną samowystarczalne i stabilne systemy ekologiczne [11, 19]. W naturalnych warunkach udział poszczególnych części składowych (runo, krzewy, drewno strzał, aparat asymilacyjny) w biomacie fitocenozy leśnych i drzewostanów zmienia się głównie z wiekiem. W drzewostanach sosnowych udział igliwia z wiekiem zmniejsza się liniowo [17, 28]. Wykazano również znaczący wpływ nawożenia mineralnego i żyzności siedlisk leśnych na udział igliwia w biomacie nadziemnej. Stwierdzono, że na powierzchniach żyzniejszych wystąpił szybszy spadek udziału biomasy igliwia z wiekiem drzewostanów [28].

Biomasa aparatu asymilacyjnego drzewostanów sosnowych wzrastających na zwałowisku bełchatowskim stanowiła odpowiednio 15 i 19% w stosunku do całkowitej biomasy nadziemnej drzewostanów. Aparat asymilacyjny, choć stanowi stosunkowo mały udział w biomacie drzewostanów, jest zasadniczą częścią składową rocznej produkcji biomasy [2].

3.3. Akumulacja węgla i energii w biomacie drzewostanów

Akumulacja węgla w biomacie 19-letnich drzewostanów w wariantcie 1 (CzPG) wynosiła $21,61 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, a w biomacie 12-letnich drzewostanów $3,97 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Na powierzchni kontrolnej ilość węgla związanego w biomacie w 17-letnim drzewostanie wynosiła $35,14 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Przeciętna wielkość wiązania węgla w biomacie drzewostanów wynosiła w wariantcie żyzniejszym na piaskach i glinach czwartorzędowych $1,27 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, a w wariantcie uboższym na piaskach trzeciorzędowych $0,33 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$.

TABELA 1
Wielkość i dystrybucja biomasy oraz ilość energii związanej w biomasie drzewostanów sosnowych (*Pinus sylvestris* L.) rosnących na zrehabilitowanej wierzchołkowej zwaliskowej zewnętrznej KWB „Bełchatów” i na siedlisku naturalnym

Obiekt	Wariant i wiek* drzewostanów, lata	Biomasa nadziemna (sucha masa), Mg · ha ⁻¹			I/BD, %	BD/WD, Mg·ha ⁻¹ ·rok ⁻¹	Akumulacja węgla C, Mg · ha ⁻¹		AEB (kJ · ha ⁻¹) × 10 ⁶
		BD n = 4	BS	I			w biomasie n = 4	C/rok	
Bełchatów	1 CzPG [17]	44,26^a (8,34)	38,45^a (8,57)	5,81^a (1,08)	13,1	2,61^a	21,61 (4,65)	1,27^a (0,27)	432,2
	2 TPK [12]	8,12^b (2,60)	6,43^b (2,61)	1,69^b (0,40)	20,8	0,68^b	3,97 (1,45)	0,33^b (0,12)	79,4
Powierzchnia porównawcza	(P) BMśw [19]	75,75	75,07	6,08	8,0	3,99	35,14	1,85	702,8

Wyjaśnienia: * — warianty żywnościowe siedlisk opisano tekście; **44,26** (8,34) — średnia i (SD); BD — całkowita biomasa drzewostanu (drewna i aparatu asymilacyjnego drzew); BS — biomasa pni bez gałęzi i aparatu asymilacyjnego; I — aparat asymilacyjny (igłowie sosny); WD — wiek drzewostanów; AEB — akumulacja (ilość związanej energii w biomasie); **44,26^a** — zaznaczone różnice pomiędzy wariantami 1 i 2 są istotne z $p < 0,05$

Na porównywanym siedlisku naturalnym w biomase przeciętnie wiązane jest $1,85 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. W przeliczeniu na ilość wiązanego w procesie fotosyntezy dwutlenku węgla (CO_2 — przelicznik wynikający ze stosunków masowych pierwiastków w cząsteczce wynosi około 3,66) można szacować, że do wyprodukowania biomasy drzewostanów w ekosystemie wiązane jest odpowiednio: na siedliskach lepszych w wariancie 1 — $4,65 \text{ MgCO}_2 \text{ ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, w wariancie uboższym 2 — $1,21 \text{ MgCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, a na siedliskach naturalnych $6,77 \text{ MgCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$. Całkowita ilość wiązanego dwutlenku węgla w procesie fotosyntezy do wyprodukowania w ekosystemie biomasy wynosiła odpowiednio na siedliskach lepszych na zwałowisku $1\ 581,9 \text{ MgCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$, na siedliskach słabszych $290,6 \text{ MgCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$, a porównawczo na siedliskach naturalnych $2\ 572,2 \text{ MgCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}$.

Ilość energii związanej w procesie fotosyntezy w biomase drzewostanów w wariancie 1 (CzPG) wynosiła $432,2 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$, a w wariancie 2 (TPK) $79,4 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$. W biomase drzewostanu na powierzchni kontrolnej ilość związanej energii i wynosiła $702,8 \text{ GJ}\cdot\text{ha}^{-1}$.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania miały na celu określenie potencjalnych możliwości produkcyjnych siedlisk na wierzchowinie zwałowiska w perspektywie pozyskania w przyszłości biomasy dla celów energetycznych. Jak wskazują doświadczenia niemieckie z Dolnośląskiego Zagłębia Węglowego, plantacje energetyczne na rekultywowanych zwałowiskach po odkrywkowym wydobyciu węgla brunatnego mają uzasadnienie gospodarcze i przyrodnicze. Wykazano, że sosna zwyczajna posiada znaczne zdolności przystosowawcze do wzrostu na siedliskach powstających na terenach pogórnicych. Biomasa drzewostanów sosnowych w początkowych fazach rozwojowych (I klasie wieku) na zalesionym zwałowisku zewnętrznym KWB „Bełchatów” była stosunkowo wysoka w porównaniu do stanowisk kontrolnych w drzewostanach naturalnych oraz danych literaturowych. Wykazano wpływ rodzaju utworów budujących gleby na zwałowisku (utwory trzecio- i czwartorzędowe) na produktywność powstających ekosystemów. Pod względem produktywności najbardziej odpowiednio dla sosny siedliska wystąpiły w wariancie 1 (CzPG) na czwartorzędowych utworach piaszczysto-gliniastych i gliniastych. Drzewostany sosnowe osiągnęły tu najwyższą biomasa w wieku 19 lat oraz najwyższy przeciętny przyrost roczny biomasy, stanowiący ponad 50% w stosunku do siedliska porównawczego. Wyraźnie piaski trzeciorzędowe po neutralizacji stanowią gorsze siedlisko dla sosny niż piaski gliniaste i gliny czwartorzędowe. Różnice (istotne statystycznie, $p < 0,05$) w stanie i dystrybucji biomasy pomiędzy wariantami, występujące na wierzchowinie zwałowiska KWB „Bełchatów” były też związane z różnicą wieku drzewostanów. Udział aparatu asymilacyjnego w biomase nadziemnej drzew, wpływającego znacząco na produktywność ekosystemów, był zbliżony do stanowisk naturalnych, przy czym cecha ta różnicowała istotnie warianty żyznościowe siedlisk. Na podstawie uzyskanych wyników można szacować, że na badanym zwałowisku monokultury sosnowe w I klasie wieku mogą produkować od $8,0$ do $40,0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, a średnio ponad

25,0 Mg·ha⁻¹ suchej biomasy, co daje możliwość pozyskania od 80 do ponad 400 GJ·ha⁻¹ energii z biomasy.

Stanowiło to od 10 do 50%, a średnio około 30% możliwości produkcyjnych w stosunku do porównywanego siedliska w lesie gospodarczym w sąsiedztwie zwałowiska.

LITERATURA

- [1] *Altman D.G.*: Practical statistics for medical research. London: Chapman and Hall, 1991
- [2] *Assmann E.*: The principles of forest yield study: Studies in the organic production, structure, increment, and yield of forest stands. Oxford Pergamon Press, 1970
- [3] *Baumann K., Rumpelt A., Schneider B.U., Marschner P., Hüttl R.F.*: Seedling biomass and element content of *Pinus sylvestris* and *Pinus nigra* grown in sandy substrates with lignite. *Geoderma*, 136: 573–578, 2006
- [4] *Bradshaw A.D., Hüttl R.F.*: Future minesite restoration involves a broader approach. *Ecological Engineering*, 17, (2–3): 87–90, 2001
- [5] *Brown S.*: Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116(3): 363–372, 2002
- [6] *Bungart R., Bens O., Hüttl R.F.*: Production of bioenergy in post-mining landscapes in Lusatia Perspectives and challenges for alternative land use systems. *Ecological Engineering*, 16(1): 5–16, 2000
- [7] *Fober H.*: Żywnienie mineralne, (w): *Biologia sosny zwyczajnej* pod red. Białobok S., Boratyński A., Bugała W., PAN, Instytut Dendrologii, Wydaw. Sorous, Poznań-Kórnik, s. 182–193, 1993
- [8] *Fox J.*: Regression Diagnostics: Quantitative applications in the social sciences, series 07–079. Sage University Paper, The International Professional Publishers, Newbury Park, London, New Delhi, 1991
- [9] *Hüttl R.F., Weber E.*: Forest ecosystem development in post-mining landscapes, a case study of the Lusatian lignite district. *Naturwissenschaften*, 88: 322–329, 2001
- [10] *Katzur J., Haubold-Rosar M.*: Amelioration and reforestation of sulfurous mine soils in Lusatia (Eastern Germany). *Water, Air and Soil Pollution* 91: 17–32, 1996
- [11] *Knoche D., Embacher A., Katzur J.*: Water and element fluxes of red oak ecosystems during stand development on post-mining sites (Lusatian Lignite District). *Water, Air, and Soil Pollution*, 141: 219–231, 2002
- [12] *Krebs Ch.J.*: Ekologia. Eksperymentalna analiza rozmieszczenia i liczebności. PWN, Warszawa, 1997
- [13] *Krzaklewski W.*: Land reclamation by initial vegetation. 4-th International symposium on the Reclamation, Treatment and Utilization of Coal mining wastes. Kraków. Poland, 6–10 september 1993, s. 779–789, 1993
- [14] *Krzaklewski W.*: Rekultywacja obszarów pogórnicych i przemysłowych, w: *Przemiany środowiska naturalnego a ekorozwój*, red. Maciej J. Kotarba. Wydawnictwo TBPŚ Geosfera, Kraków s. 85–104, 2001
- [15] *Krzaklewski W., Kowalik S., Wójcik J.*: Rekultywacja utworów toksycznie kwaśnych w górnictwie węgla brunatnego, monografia, Wydawnictwo MONOS, Kraków, 1997
- [16] *Obmiński Z.*: Zarys Ekologii. (w) S. Białobok: *Nasze Drzewa Leśne, Monografie Popularno-Naukowe, Sosna Zwyczajna (Pinus sylvestris L.)*, s. 203–231. Warszawa–Poznań: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1970
- [17] *Orzeł S., Socha J., Forgiel M., Ochal W.*: Biomasa i roczna produkcja drzewostanów mieszanych Puszczy Niepołomickiej. *Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Rat. Ind. Lignar.* 4(2): 63–79, 2005
- [18] *Pietrzykowski M.*: Charakterystyka wybranych cech roślinności drzewiastej na terenach rekultywowanych oraz na powierzchniach pozostawionych procesowi sukcesji na przykładzie powierzchni badawczych na wyrobisku kopalni piasku „Szczakowa”. *Acta Agraria et Silvestria*, series *Silvestria*. Vol. XLIII: 1–26, 2005
- [19] *Pietrzykowski M.*: Macronutrient accumulation and relationships in a Scots pine (*Pinus sylvestris L.*) ecosystem on reclaimed opencast lignite mine spoil heaps in central Poland. *Proceedings of 25th Annual Meeting of ASMR and 10th IALR*, Richmond, Virginia, USA, June 14 to 19, 2008. s. 856–877, 2008
- [20] *Pietrzykowski M., Krzaklewski W.*: An assessment of energy efficiency in reclamation to forest. *Ecological Engineering*, 30: 341–348, 2007
- [21] *Rodrigue J.A., Burger J.A., Oderwald R.G.*: Forest productivity and commercial value of pre-law reclaimed mined land in the eastern United States. *Northern Journal of Applied Forestry*, 19(3): 106–114, 2002
- [22] *Shrestha R.K., Rattan L.*: Ecosystem carbon budgeting and soil carbon sequestration in reclaimed mine soil. *Environment International*, 32 (6): 781–796, 2006
- [23] *Socha J., Wężyk P.*: Allometric equations for estimating the foliage biomass of Scots pine. *European Journal of Forest Research*. 126: 263–270, 2007

- [24] StatSoft, Inc. (2008) STATISTICA (data analysis software system), version 8. www.statsoft.com
- [25] *Suliński J.*: The amount of biomass as a function of the height and density of a tree stand. Proceedings of the III National Conference on Application of Mathematics in Biology and medicine, Mađralin, September 16–19, s. 85–90, 1997
- [26] *Temesgen H, Gadow K.V.*: Generalized height-diameter models-an application for major tree species in complex stands of interior British Columbia. *European Journal of Forest Research*, 123: 45–51, 2004
- [27] *Vanninen P., Yliäalo H., Sievänen R., Mäkelä A.*: Effects of age and site quality on the distribution of biomass in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Trees*, 10: 231–238, 1996
- [28] *Weiner A.*: *Zycie i ewolucja biosfery*. PWN, Warszawa, 2004
- [29] *Woś A.*: *Klimat Polski*. PWN, Warszawa, 1999