

ANDRZEJ NIENARTOWICZ, ADAM BARCIKOWSKI

Wykorzystanie energii słonecznej przez fitocenozy leśne jako wskaźnik ich zrównoważenia ekologicznego

Utilization of Solar Energy by Forest Phytocenoses as Indicator of Their Ecological Equilibrium

Wstęp

Efektem oddziaływania człowieka na zbiorowiska roślinne jest — obok przekształceń składu gatunkowego — zmiana ich produkcji i stanu biomasy. Każdy z tych parametrów, a także ich iloraz, stosowane są w ekologii od wielu lat do określania różnic w funkcjonowaniu ekosystemów pionierskich i dojrzałych oraz do wyrażania stopnia osiągnięcia przez układy ekologiczne stanu ekwifinalnego w procesie sukcesji (16, 19, 20). W ostatnich latach wielkość produkcji i stan biomasy posłużyły też do identyfikacji zgodności użytkowania zbiorowisk roślinnych z koncepcją trwałego i zrównowżonego rozwoju. Dla porównania stanu energetycznego fitocenoz użytkowanych przez człowieka w stosunku do zbiorowisk naturalnych stosowany jest pomiar tzw. kapitału biofizycznego i kosztu negentropijnego, który podtrzymuje funkcjonowanie układu ekologicznego (8, 9). Pierwsza wielkość oznacza sumę energii słonecznej związanej w produkcji pierwotnej brutto (Gross Primary Production — GPP) oraz wykorzystanej przez rośliny na aktywny przepływ wody (Plant Active Water Flow — PAWF), t.j. transpirację i towarzyszący jej transport biogenów, przypadającą na jednostkę powierzchni (m^2) zajmowanej przez zbiorowisko roślinne. Natomiast koszt negentropijny to kapitał biofizyczny w przeliczeniu na jednostkę biomasy roślin (kg) porastających m^2 gleby.

Na podstawie analizy wielu opracowań, a zwłaszcza wykonanych w ramach Międzynarodowego Programu Biologicznego (International Biological Programme — IBP), ekolodzy włoscy i amerykańscy (8, 9) stwierdzili, że w ekosystemach naturalnych różnego typu kapitał biofizyczny jest bardzo zmienny, natomiast koszt negentropijny w tych systemach ma wartość stałą. Zmienia się on szczególnie pod wpływem działalności gospodarczej człowieka, który odmładzając fitocenozy i zasilając je energią kulturową (paliwa, nawozy, środki ochrony roślin, praca ludzi i zwierząt pociągowych) wzmacnia efektywność wykorzy-

stania przez nie energii słonecznej. Wzrostowi użyciu energii słonecznej towarzyszy spadek stanu biomasy zbiorowiska roślinnego. Istotne zmiany parametrów energetycznych zachodzą przede wszystkim wówczas, gdy przekształcenia struktury fitocenozy sięgają poziomu zmian formacji roślinnych. Przykładem szczególnie silnych przeobrażeń są pola orne założone na miejscu lasu tropikalnego (8).

Niniejsza praca przedstawia stopień wykorzystania energii słonecznej przez uprawy leśne stanowiące stadia rozwojowe w procesie sukcesji wtórnej. Celem pracy było porównanie ich kapitału biofizycznego i kosztu negentropijnego z wartościami tych parametrów oszacowanych dla naturalnych zbiorowisk leśnych. Dokonano też oceny kapitału biofizycznego i kosztu negentropijnego dla większego obszaru, którym był obręb leśny.

Teren badań i metodyka

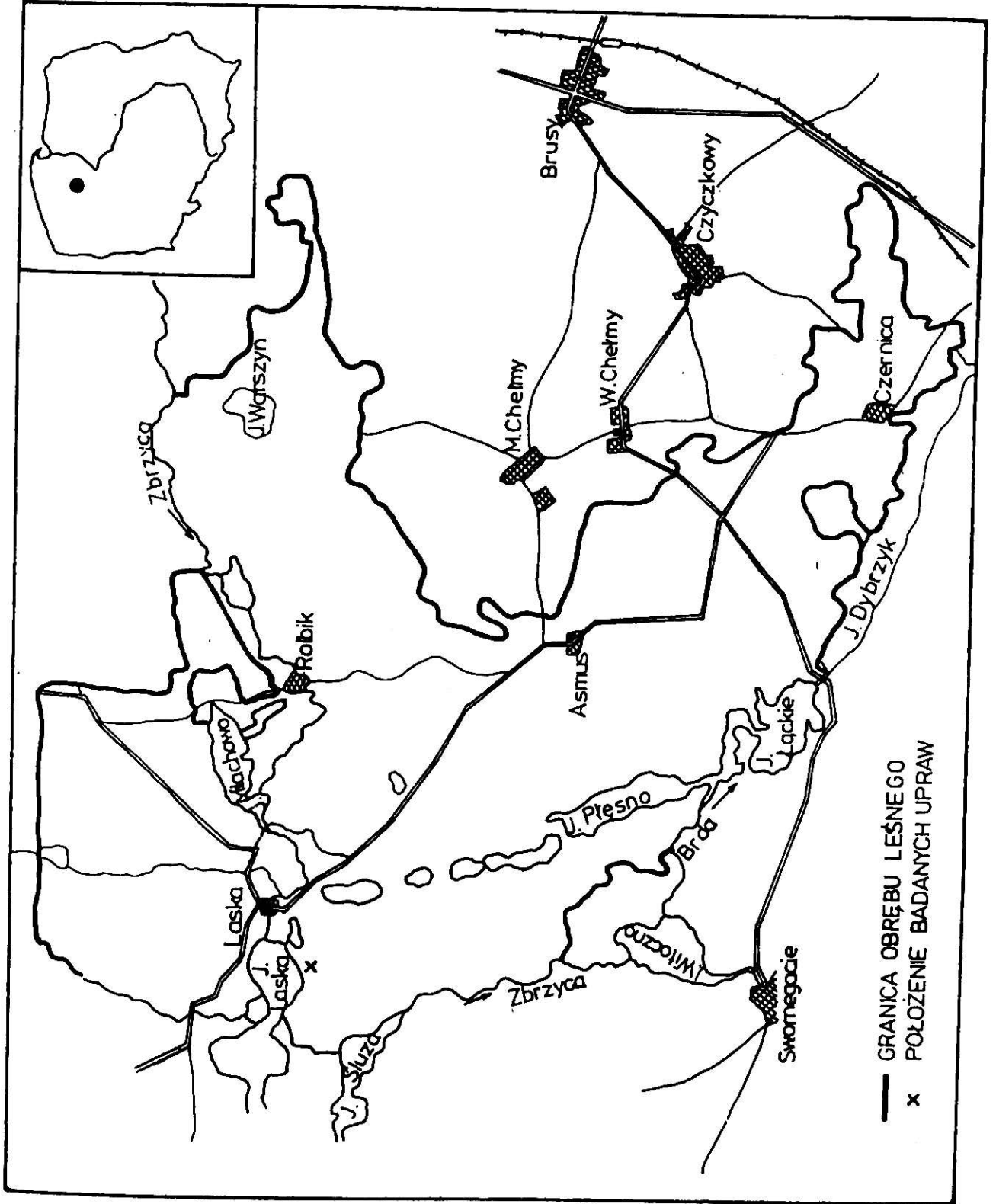
Badania nad energetyką fitocenozy przeprowadzono w uprawach leśnych różnego wieku na siedlisku boru świeżego (*Leucobryo-Pinetum* Mat. 1962) w obrębie leśnym Laska Nadleśnictwa Przymuszewo. Teren badań położony jest przy północnej granicy województwa bydgoskiego, na zachód od miasta Brusy (ryc. 1). Jest to makroregion Pojezierze Południowo-Pomorskiego, mezoregion Równina Charzykowska (11). Pod względem geobotanicznym obszar wchodzi w skład Pojezierza Pomorskiego, okręgu Kartuskiego (22). Według podziału Polski na krainy przyrodniczo-leśne jest to kraina Wielkopolsko-Pomorska, dzielnicę Bory Tucholskie (17). Badany teren leży na obszarze "Zaborskiego Parku Krajobrazowego" i projektowanego parku narodowego "Bory Tucholskie".

W okresie badań powierzchnia obrębu leśnego wynosiła 8 471,5 ha, w tym obszary leśne stanowiły 86,56%, wody, torfowiska i wrzosowiska 8,33%, pola uprawne, sady i ogrody 1,68%, łąki i pastwiska 2,08%, a drogi, tereny zabudowane i kopalne 1,81%. Na powierzchni leśnej dominowały siedliska borów suchych (53,84%) i świeżych (43,79%). Pozostałe typy borów sosnowych zajmowały 0,36%, zaś olsy 1,01%. Na powierzchni leśnej przeważały drzewostany klasy IV (28,03%) i II (26,01%). Najmłodsze drzewostany (klasa I) zajmowały 20,23% powierzchni leśnej.

Analizowane uprawy leśne położone były na wysoczyźnie w pobliżu jeziora Laska (faunistyczny rezerwat przyrody) i w odległości około 1 km na zachód od osady Laska. Wiek fitocenozy wynosił: 3, 6, 12, 24, 60 i 120 lat.

Biomasa starszych drzew oceniono na podstawie pomiarów dendrometrycznych wykonanych w poszczególnych fitocenozach na całej powierzchni zajmowanego przez nie pododziału leśnego (0,5–1,0 ha). W obliczeniach korzystano z tabel przyrostu drzewostanów (23). Przy określaniu stanu biomasy tej grupy roślin przyjęto, że części podziemne drzew stanowią około 15% biomasy całkowitej (13). Biomasa sosny zwyczajnej młodszych klas wieku (sadzunki w uprawach i podrost w starszych stadiach sukcesyjnych) oceniono na podstawie ich zagęszczenia oraz pomiarów bezpośrednich ciężaru drzew modelowych.

Biomasa roślin zielnych i mchów w fitocenozach młodszych oszacowano na podstawie analizy wagowej roślinności pobranej z poletek w kształcie koła średnicy 39,8 cm ($0,125\text{ m}^2$) rozmieszczonych regularnie w pasach przeoranych i nieprzeoranych na wytypowanej do badań powierzchni 400 m^2 . W starszych drzewostanach parametry te szacowano w



próbach tego samego kształtu i wielkości, lecz pobranych losowo na całej powierzchni pododdziału leśnego. W każdej z sześciu badanych fitocenoz analizowano po 30 prób.

Produkcję pierwotną brutto obliczono na podstawie zmierzonej powierzchni asymilacyjnej i wskaźników ekofizjologicznych fotosyntezy brutto sosny zwyczajnej, krzewów, roślin zielnych i mchów. Powierzchnię asymilacyjną sosny zwyczajnej wyznaczono metodą wagową. Biomasa szpilek drzewostanu sosnowego obliczono korzystając z tabel określających zależność pomiędzy ciężarem igliwia a pierśnicą drzew (12). Dokonano też pomiaru biomasy igliwia ściętych drzew modelowych. Pomiary powierzchni asymilacyjnej przeprowadzono zmodyfikowaną metodą pośrednią Thomsona i Leytona (24) polegającą na obliczeniu wzrostu masy próbki szpilek, zanurzonych uprzednio w roztworze benzenowym butaprenu, po obsypaniu ich drobnoziarnistym piaskiem. Zastosowanie tej metody wymagało określenia wzrostu ciężaru ciała o znanej powierzchni powleczonej piaskiem. Do kalibracji krzywej zależności pomiędzy powierzchnią a ciężarem użyto mikroskopowych szkiełek nakrywkowych o różnych rozmiarach. Metodą wagową oznaczono też powierzchnię asymilacyjną mchów przez pomiar lanometrem powierzchni asymilacyjnej próbki tych roślin o znanym ciężarze. Wyniki uzyskane na powierzchniach próbnych przeliczono na m^2 . Szczegółowy opis zastosowanych metod oraz wyniki pomiarów stanu biomasy, powierzchni asymilacyjnej i fotosyntezy znajdują się w serii prac z zakresu ekologii produkcyjnej (1, 2, 3, 4, 5, 6), w tym również w artykułach publikowanych na łamach "Sylwana".

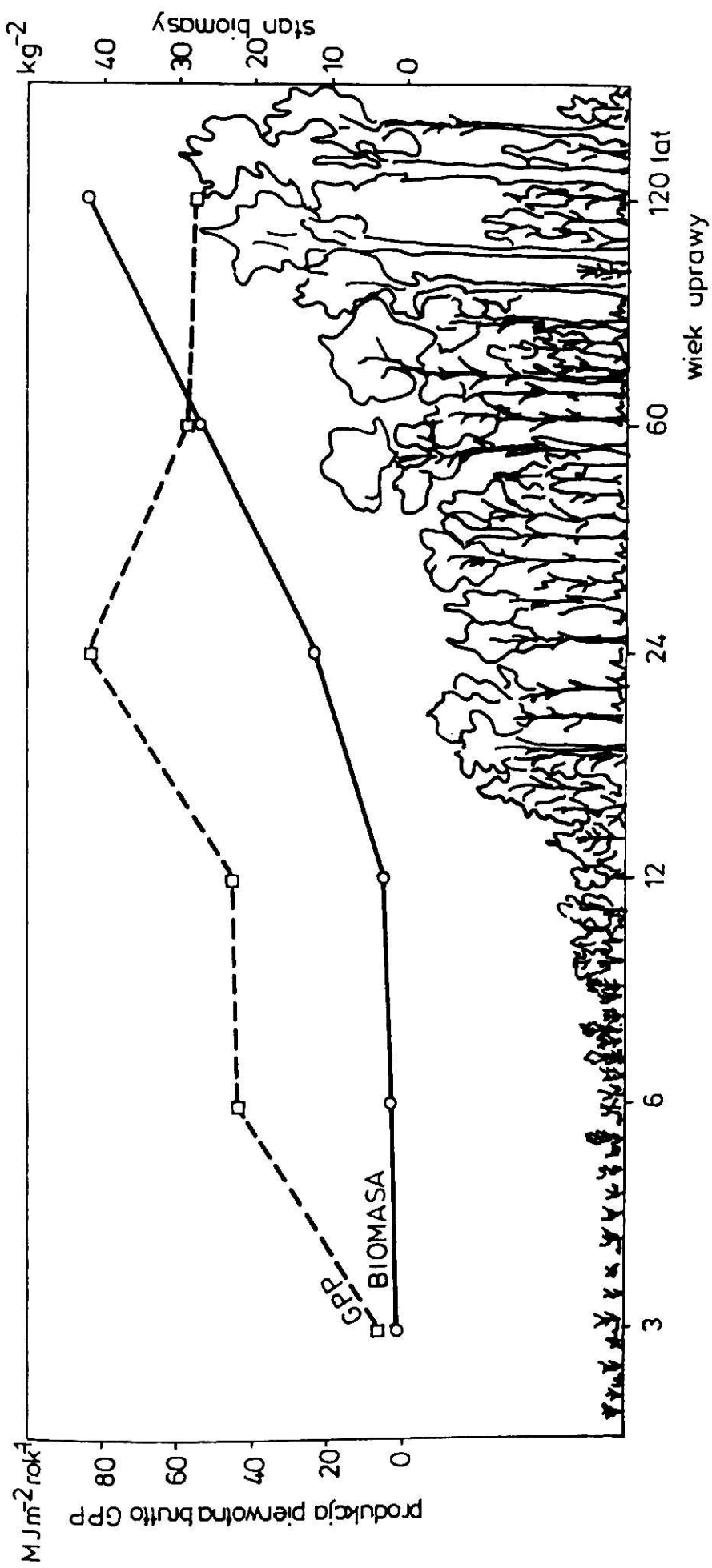
Koszt energetyczny aktywnego roślinnego przepływu wody w roślinach obliczono na podstawie przelicznika podanego w literaturze ekologicznej (8). Wynosi on 11,1J PAWF na 1J GPP.

Kapitał biofizyczny i koszt negentropijny oszacowano też dla całego obrębu Laska wykorzystując wyniki badań własnych nad produkcją pierwotną zbiorowisk leśnych, łąkowych i upraw rolnych tego terenu (18). Przy obliczaniu kapitału biofizycznego i kosztu negentropijnego innych ekosystemów korzystano z danych zawartych w opracowaniach syntetycznych IBP (14).

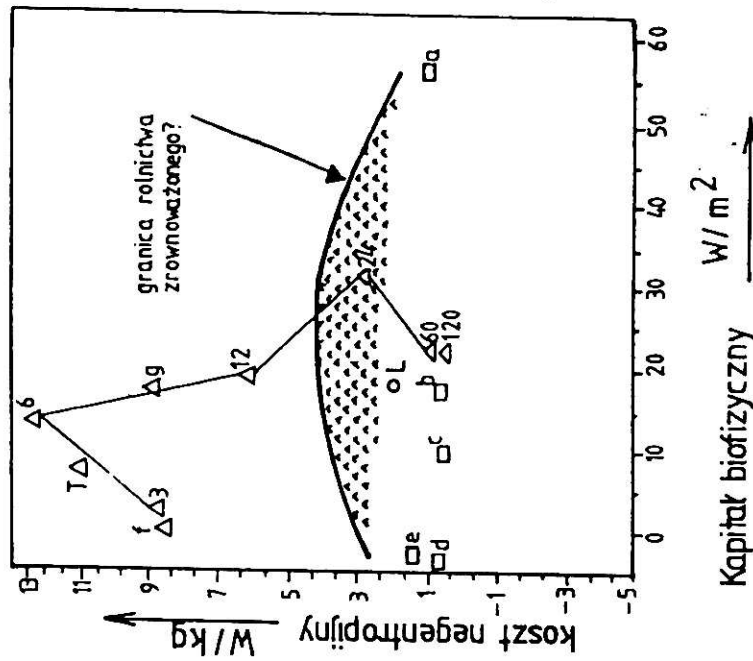
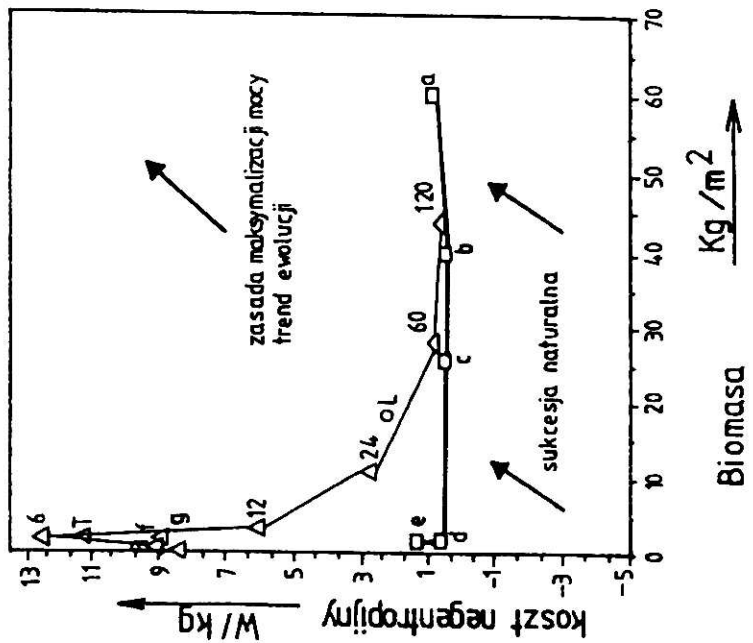
Wyniki

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że produkcja pierwotna brutto trzyletniej uprawy sosny zwyczajnej na siedlisku boru świeżego w obrębie Laska wynosi $8,40 MJ m^{-2}$. W uprawie sześcioletniej jest ona pięciokrotnie, a w 24-letniej dziesięciokrotnie wyższa od tej wartości. W ostatnim z wymienionych stadiów produkcja pierwotna brutto jest największa w całej serii sukcesyjnej. W następnych fazach rozwojowych wartość GPP jest mniejsza, stabilizuje się i w wieku 60 oraz 120 lat utrzymuje się na stałym poziomie (ryc. 2).

W podobny sposób jak produkcja pierwotna brutto w procesie sukcesji wtórnej zmienia się kapitał biofizyczny. Natomiast koszt negentropijny jest najwyższy w uprawie sześcioletniej, gdzie osiąga wartość $12,5 W kg^{-1}$. W wieku 3 lat stanowi on 80%, a w uprawie 12-letniej połowę tej wartości. W drzewostanie 60-letnim koszt negentropijny nie przekracza $1 W kg^{-1}$.



RYC. 2. Zmiany produkcji pierwotnej brutto (GPP) i stanu biomasy w procesie sukcesji wtórnej na siedlisku boru świeżego



□ Zbiorowiska naturalne

- a las tropikalny
- b las liściasty, USA
- c chapparał
- d półpustynia
- e tundra

△ Uprawy rolne i lesne

- f uprawa zbóż w strefie tropikalnej
- g uprawa zboża, USA
- T uprawy rolne w Borach Tucholskich
3, 6, 12, 24, 60, 120 uprawy lesne
na siedlisku baru świeżego w Borach
Tucholskich (liczby oznaczają wiek flocenozy)
- L obręb Łaska

RYC. 3. Kapitał biofizyczny i koszt negentropiny upraw leśnych oraz innych ekosystemów naturalnych i sztucznych

Względem hipotetycznej granicy użytkowania ekosystemów zgodnie z koncepcją trwałego i zrównoważonego rozwoju uprawy w wieku do 12 lat włącznie zajmują położenie wyższe (ryc. 3). Uprawa 24-letnia leży tuż poniżej linii granicznej. Drzewostany w wieku 60 i 120 lat rozmieszczone są na poziomie charakterystycznym dla ekosystemów naturalnych, w pobliżu miejsc, gdzie skupiają się lasy strefy umiarkowanej.

Wśród ekosystemów naturalnych skrajne położenie z prawej strony diagramu zajmuje las tropikalny. Odpowiada to kosztowi negentropijnemu zbliżonemu do innych ekosystemów naturalnych i najwyższemu stanowi biomasy. Punkt reprezentujący uprawę rolną na miejscu lasu tropikalnego umieszczony jest wysoko po lewej stronie diagramu, co wskazuje na drastyczność zmian funkcjonowania systemu ekologicznego po zniszczeniu zbiorowiska leśnego. W przypadku upraw rolnych założonych na miejscu lasów strefy umiarkowanej zmiany w energetyce fitocenozy nie są aż tak duże, ponieważ przesunięcie położenia punktów odbywa się ku górze, wzdłuż linii pionowej, a nie po przekątnej diagramu. Koszt negentropijny obliczony dla całego obrębu leśnego Laska wynosił $2,17 \text{ kg}^{-1}$. Punkt reprezentujący badany obręb umieszczony jest również poniżej linii granicznej, w pobliżu tych miejsc na diagramie, gdzie zlokalizowane są dojrzałe ekosystemy leśne. O takim położeniu obrębu względem hipotetycznych wartości granicznych zadecydowała przewaga na tym terenie drzewostanów powyżej I klasy wieku, duża powierzchnia torfowisk oraz mały udział w strukturze użytkowania ziemi pól uprawnych i łąk wykorzystywanych przez pracowników Nadl. Przymuszewo. W wyniku porównania z innymi systemami ekologicznymi określono, że uprawa żyta w osadzie Asmus, położonej na terenie obrębu Laska, ma wartość znacznie większą od hipotetycznej granicy stanu równowagi ekologicznej.

Dyskusja i wnioski

Przedstawione kierunki zmian produkcji pierwotnej i biomasy w procesie rozwoju fitocenozy leśnej na siedlisku boru świeżego są zgodne z trendami obserwowanymi w innych seriach sukcesyjnych. W kilku opracowaniach dotyczących regeneracji lasu po zrębie zupełnym podawany jest również szybki wzrost produkcji w pierwszych latach rozwoju do maksimum w wieku drzewostanu około 20-30 lat, a następnie jej nieznaczny spadek (10,20). Stan biomasy sosny zwyczajnej, podobnie jak i całej fitocenozy, wykazuje natomiast ciągły wzrost w procesie sukcesji wtórnej. Przy takich relacjach produkcji i stanów biomasy w kolejnych fazach rozwoju zbiorowiska roślinnego względna produkcja pierwotna w przeliczeniu na jednostkę biomasy jest znacznie większa w młodszych uprawach niż w dojrzałych drzewostanach.

Najmłodsze klasy wieku drzewostanu sosnowego to fazy, w których aparat asymilacyjny fitocenozy jest największy w stosunku do tkanki nieasymilującej. Występująca w tych stadiach rozwojowych największa ingerencja człowieka w strukturę fitocenozy intensyfikuje proces produkcji pierwotnej. Znaczny udział organów asymilacyjnych w jednostce biomasy w kilkuletnich uprawach powoduje, że koszt negentropijny jest w tym okresie największy. We wszystkich fazach rozwojowych fitocenoza z jednakową intensywnością realizuje jedną z podstawowych zasad ekologicznych, tj. zasadę maksymalizacji przepływu energii (15), jednak w warunkach największego uproszczenia struktury i odmłodzenia zbiorowiska roślinnego (kosztem energii wyzwolonej działalnością ludzką) efektywność

wykorzystania energii słonecznej na jednostkę biomasy części nadziemnych i podziemnych jest największa. Przedstawiona metoda energetyczna, oparta na wyznaczaniu kapitału biofizycznego i kosztu negentropijnego, dobrze odróżnia ekosystemy młodsze i sztuczne od dojrzałych i naturalnych. Pozwala też porównać ze sobą większe obszary o różnym sposobie zagospodarowania i użytkowania ekosystemów. Ujemną cechą metody jest stosowanie stałego przelicznika PAWF przy wyznaczaniu wymienionych parametrów energetycznych wyrażających stan rozwojowy fitocenozy leśnej.

Z Zakładu Ekologii Roślin i Ochrony Przyrody
Instytutu Biologii i Ochrony Środowiska UMK

Literatura

1. **Barcikowski A.:** Energy flow changes related to the development of assimilatory organ biomass in suboceanic fresh pine forest *Leucobryo-Pinetum* Mat. 1962. Ecol. pol. 1991 vol. 39.
2. **Barcikowski A.:** Differentiation in the structure and secondary succession W: Bohr R., Nienartowicz A., Wilkoń-Michalska J. (red.) Some ecological processes of the biological systems in North Poland. Toruń: Nicholas Copernicus University Press 1991.
3. **Barcikowski A., Loro P.M.:** Straty w produkcji pierwotnej brutto ekosystemów leśnych wywołane zabiegami gospodarczymi w aspekcie "efektu cieplarnianego". Sylwan 1995, w druku.
4. **Barcikowski A., Loro P.M.:** Porównanie biomasy igliwia sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) młodszych klas wieku ocenionej za pomocą metody pośredniej Lemkego i na podstawie drzew modelowych. Sylwan 1995 Rok CXXXIX nr 1.
5. **Barcikowski A., Loro P.M.:** Biomasa igliwia oraz cechy dendrometryczne samosiewów sosny (*Pinus sylvestris* L.) młodszych klas wieku rozwijającej się na siedlisku boru świeżego. Sylwan 1995 Rok CXXXIX nr 2.
6. **Barcikowski A., Zbigniewicz M.:** Green biomass and chlorophyll of plant communities in primary succession of raised bog. Ecol. Pol. 1992 vol. 40.
7. **Bormann F.H., Likens G.E.:** Pattern and process in a forested ecosystem Disturbance, development and the steady state based on the Hubbard Brook ecosystem study. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1979.
8. **Giampietro M., Cerretelli G., Pimentel D.:** Energy analysis of agricultural ecosystem management: Human return and sustainability. Agriculture, Ecosystems and Environment 1992 vol. 38.
9. **Giampietro M., Pimentel D.:** Energy analysis models to study the biophysical limits for human exploitation of natural processes. W: Rossi C., Tiezzi E. (red.) Ecological Physical Chemistry, Proceedings of an International Workshop, 8–12 November 1990, Siena, Italy. Amsterdam: Elsevier Science Publisher b.v. 1991.

10. **Kira T., Schidei T.:** Primary production and turnover of organic matter in different forest ecosystems of the Western Pacific. *Japanese J. Ecol.* 1967 vol. 17.
11. **Kondracki J.:** *Geografia fizyczna Polski.* Warszawa: PWN 1978.
12. **Lemke J.:** Szacowanie ciężaru świeżego igliwia sosny zwyczajnej. *Sylwan* 1975 Rok CXIX nr 5.
13. **Lieth H.:** The determination of plant dry matter production with special emphasis on the underground parts. W: Eckhardt F.E. (red.) *Functioning of terrestrial ecosystems at the primary production level. Proceedings of the Copenhagen Symposium (UNESCO).* Nat. Res. Research 1979 vol. 5.
14. **Lieth H., Whittaker R.H. (red.):** *Primary productivity of the biosphere.* Ecol. Stud. 14. New York: Springer-Verlag 1975.
15. **Lotka A.J.:** Contribution to the energetics of evolution. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 1922 vol. 18.
16. **Margalef R.:** On certain unifying principles in ecology. *Am. Nat.* 1963 vol. XCVII.
17. **Mroczkiewicz L.:** Podział Polski na krainy i dzielnice przyrodniczo-leśne. *Prace IBL* 1952 vol. 80.
18. **Nienartowicz A.:** *Energetyka dużych systemów ekologicznych.* Toruń: Wyd. UMK, w druku.
19. **Odum E.P.:** The strategy of ecosystem development. *Science* 1969, vol. 164.
20. **Odum E.P.:** *Podstawy ekologii.* Warszawa: PWRiL 1982.
21. **Ovington J.D.:** Some aspects of energy flow in plantations of *Pinus sylvestris* L. *Ann. Bot.* 1961 vol. 25.
22. **Szafer W.:** Geobotaniczny podział Polski. W: Zarzycki K. (red.) *Szata roślinna Polski.* Warszawa: PWN 1972 T. II.
23. **Szymkiewicz B.:** *Tablice zasobności i przyrostu drzewostanów.* Warszawa: PWRiL 1971.
24. **Thomson F.B., Leyton L.:** Method for measuring the leaf surface area of complex shoots. *Nature* 1971 vol. 229.

Summary

Utilization of energy by forest phytocenoses as indicator of their ecological equilibrium

This paper outlines the utilization of solar energy by *Pinus sylvestris* L. plantations in habitats of fresh pine forest. The utilization was expressed as the sum of gross primary production and energy spent for plant active water flow (PAWF) per area unit (m^2) and plant biomass unit (kg). The first equation is the so-called biophysical capital and the second

means negentropic cost (8). Negentropic cost is equal in natural communities of various types and is much bigger in artificial ecosystems.

In 3-, 6- and 12-year-old pine plantations negentropic cost is much bigger than in natural phytocoenoses. The maximum is reached in 6-year-old plantation. The negentropic cost of 24-year plantation already comes within the interval defined by ecologists (8) for ecologically balanced agriculture. Biophysical capital and negentropic cost of 60- and 120-years-old managed forest are similar to those of mature forests in temperate zone.

The forest district Laska in North-Western Poland (total area 8471,5 ha) with 86,56% of forests, 8,33% of aquatic ecosystems, wetlands and heathlands and only 3,76% of lands utilized for agriculture (gardens, fields, meadows and pastures) reaches negentropic cost $2,17 \text{ W kg}^{-1}$. This value is in the range characteristic for regions utilizing with the rule of sustainable development.