

ELŻBIETA MALZAHN

Instytut Badawczy Leśnictwa

Zakład Lasów Naturalnych

17-230 Białowieża

e-mail:emalzahn@las.ibl.bialowieza.pl

MONITORING ZAGROŻEŃ I ZANIECZYSZCZENIA ŚRODOWISKA LEŚNEGO PUSZCZY BIAŁOWIESKIEJ

WSTĘP

Instytut Badawczy Leśnictwa prowadzi na całym obszarze kraju od 1986 r. program monitoringu lasu, polegający na gromadzeniu materiału dokumentacyjnego umożliwiającego aktualną ocenę jego kondycji, wyznaczaniu trendów różnorodnych procesów w nim zachodzących i prognozowaniu sytuacji zdrowotnej lasów w Polsce według kryteriów rekomendowanych przez Unię Europejską. W ramach rozszerzanego stale zakresu badań na 148 stałych powierzchniach obserwacyjnych realizowany jest szeroki program identyfikacji czynników środowiska, mających decydujący wpływ na zdrowotność drzewostanów. Dwie takie powierzchnie zlokalizowane są w Puszczy Białowieskiej i one reprezentują Puszczę w skali krainy przyrodniczo-leśnej. Wyniki badań monitoringowych są zamieszczane w corocznych raportach pt. „Stan uszkodzenia lasów w Polsce”, wydawanych w serii „Biblioteka Monitoringu Środowiska”. W 2000 r. stopień przedzielenia koron drzew w Puszczy Białowieskiej mieścił się w granicach 21–25%, co ozna-

cza „stan ostrzegawczy” (DOBROWOLSKI i współaut. 2001).

Puszcza Białowieska zasługuje na dokładniejszą analizę zagrożeń z wielu względów, m.in. z powodu unikalnej wartości przyrodniczej i nie spotykanego w innych lasach niżu europejskiego znacznego stopnia naturalności drzewostanów, co czyni z niej wzorzec naturalnych mechanizmów obrony ekosystemów leśnych przed presją różnych czynników środowiska. Wpływ czynników antropogenicznych na stan środowiska leśnego jest tu najbardziej widoczny w silnym zanieczyszczeniu jednej z puszczańskich rzek – Leśnej Prawej. Na całym obszarze Puszczy w ostatniej dekadzie obserwowane są zmiany w składzie epifitycznych porostów oraz eutrofizacja siedlisk leśnych, za których przyczynę uznawane są zanieczyszczenia powietrza (SOKOŁOWSKI 1991). Z tych powodów Zakład Lasów Naturalnych IBL w Białowieży prowadzi od 1986 r. program monitoringu regionalnego na całym obszarze polskiej części Puszczy, w tym również na obszarze Białowieskiego Parku Narodowego.

MONITORING TECHNICZNY

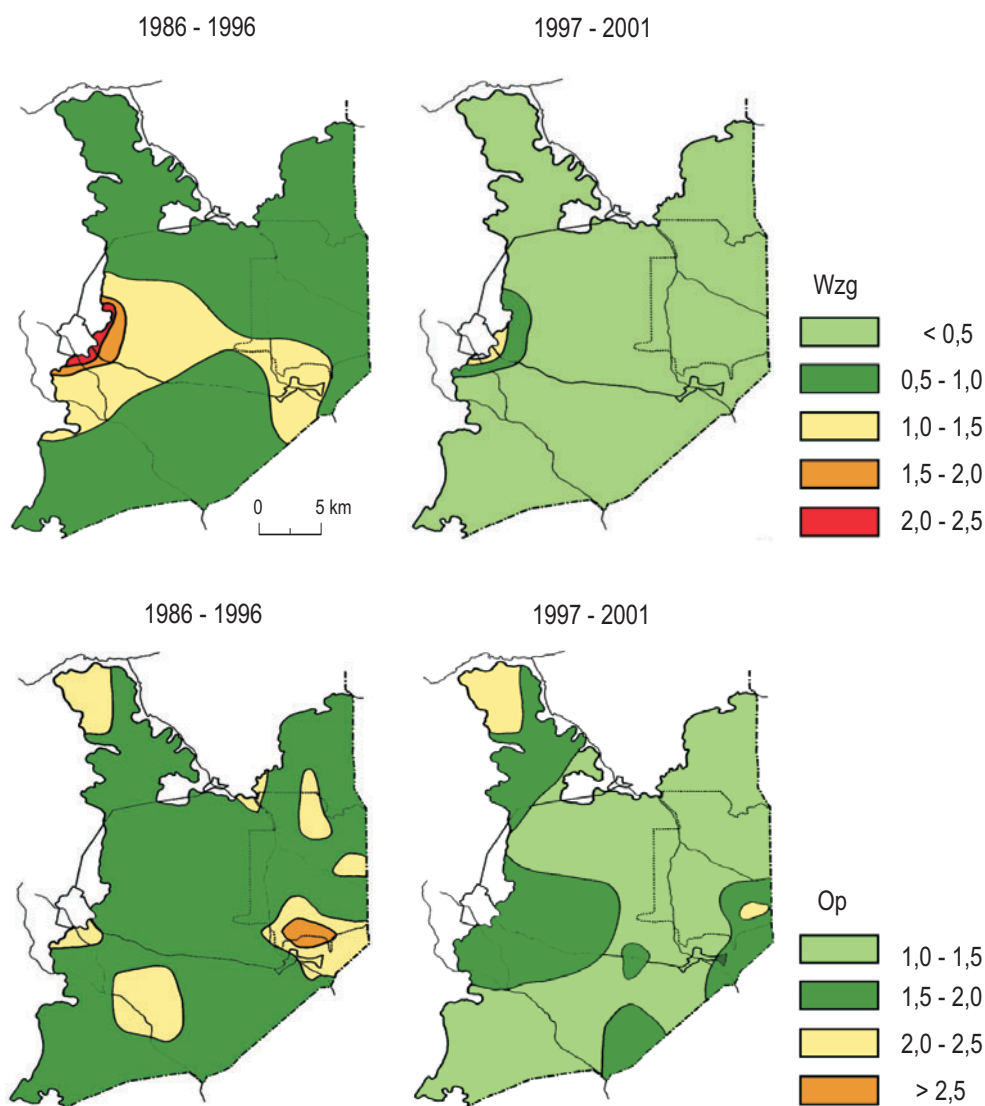
Potencjalne zagrożenie środowiska leśnego, jakie stanowią zanieczyszczenia powietrza, jest oceniane poprzez realizowany od 1986 r. monitoring techniczny, w skład którego

wchodzi pomiar depozycji suchej (SO_2 i NO_x) i opadu pyłów (w sieci 25 punktów pomiarowych) oraz depozycji mokrej, poprzez badanie kwasowości i składu chemicznego opadów at-

mosferycznych w Białowieży (MALZAHN 2001). Depozycja sucha obejmuje cząsteczki gazów i pyłów wprowadzane do lasów przez osiadanie oraz substancje gazowe nie rozpuszczone w wodzie. Depozycja mokra (deszcz, śnieg) wnosi do ekosystemu substancje gazowe rozpuszczone w wodzie oraz pyły i aerozole wymywane z atmosfery przez deszcz. Na ocenę aktualnego poziomu i kierunku zmian zanieczyszczeń powietrza na obszarze Puszczy wpływają zróżnicowane, własne i literaturowe, kryteria wartościowania.

Na podstawie wieloletnich zmian rozkładu przestrzennego depozycji suchej, reprezentowanej przez współczynnik sumy obciążenia zanieczyszczeniami gazowymi powietrza (Wzg), można wnioskować o ciągłej poprawie jakości powietrza (Ryc. 1). W porównaniu z okresem

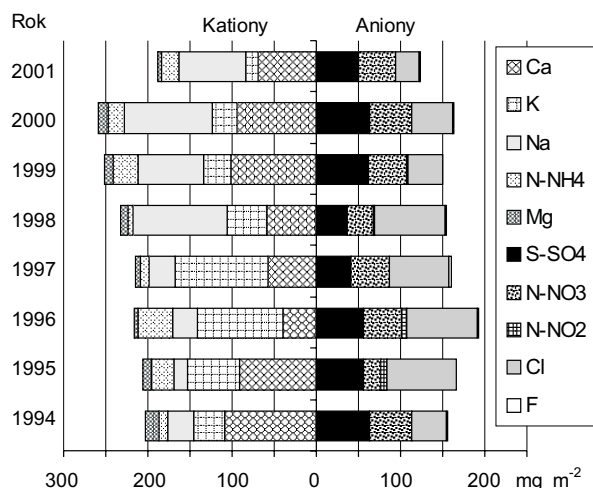
1986–1996 (MALZAHN 1999), w ostatnich pięciu latach współczynnik Wzg był podobny na całym obszarze Puszczy i tylko na małym obszarze przylegającym do miasta Hajnówki przekraczał przyjętą dla Puszczy wartość krytyczną równą 1. Obszar Białowieckiego Parku Narodowego znajdował się w strefie najmniejszego obciążenia zanieczyszczeniami gazowymi. W ostatnich latach zmniejszał się również opad pyłów (Op) na całym obszarze Puszczy, a zwłaszcza na polanie białowiejskiej. Natomiast depozycję mokrą zanieczyszczeń powietrza, ocenianą na podstawie podwyższonego poziomu kwasowości opadów atmosferycznych (średnie pH 4,57) oraz stosunkowo dużego udziału kwaśnych deszczy (pH < 4,6) w sumie opadów atmosferycznych (36,8 %), zaliczono do istotnych zagrożeń, podkreślając jej wpływ



Ryc. 1. Rozkład przestrzenny sumarycznego współczynnika obciążenia zanieczyszczeniami gazowymi (Wzg) i opadu pyłów (Op) na obszarze Puszczy Białowiejskiej w latach 1986–2001.

Wzg 1 = $5 \text{ mg SO}_2 \text{ m}^{-2} 24 \text{ h}^{-1} + 0,1 \text{ mg NO}_x \text{ m}^{-2} 24 \text{ h}^{-1}$; Op – $\text{g m}^{-2} \text{ miesiąc}^{-1}$.

na przyspieszenie tempa zakwaszenia środowiska leśnego (MALZAHN 2000). Skład chemiczny opadów atmosferycznych w Białowieży w kolejnych latach zmieniał się w mniejszym stopniu i w mniej regularny sposób niż zawartość zanieczyszczeń gazowych w powietrzu (Ryc. 2). W latach 1994–2001 roczny opad mo-



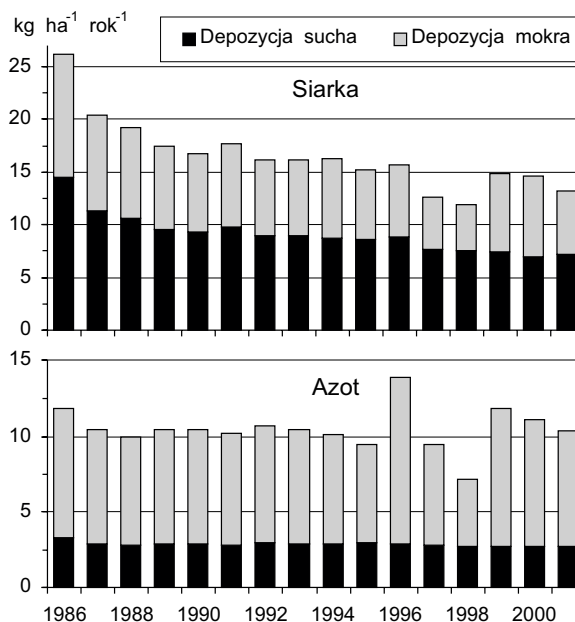
Ryc. 2. Struktura opadu mokrego kationów i anionów w Białowieży w latach 1994–2001.

kry sumy kationów był z reguły wyższy niż opad sumy anionów. W porównaniu z poziomem jonów w opadach atmosferycznych w innych lasach zwracało uwagę stosunkowo duże stężenie jonów azotu utlenionego w Puszczy, czego skutkiem był duży opad mokry azotu, np. opad $N-NO_3$ w Puszczy w latach 1994–2001 wynosił $7,2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$, podczas gdy w krajach europejskich w latach 90. wahał się w granicach $0,4\text{--}7,6 \text{ kg}$, a w Polsce południowej wynosił $5,3 \text{ kg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ (SZAREK-LUKASZEWSKA 1999).

Poziom depozycji całkowitej siarki i azotu w Puszczy Białowieskiej można interpretować w różny sposób (Ryc. 3). Średnia depozycja całkowita siarki w latach 1986–2001 składała się w 55% z depozycji suchej i 45% z mokrej. W 2001 r. jej poziom wynosił 13 kg ha^{-1} . Przyjęty na świecie poziom krytycznego obciążenia lasów siarką wynosi, w zależności od własności buforowych gleby, od 3 do $32 \text{ kg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$. Obciążenia siarką lasów Puszczy Białowieskiej znajdowało się w połowie przedziału wartości krytycznej i było dużo niższe od przeciętnego obciążenia lasów europejskich. Było jednak o co najmniej 3 kg ha^{-1} wyższe od proponowanej wartości krytycznej depozycji siarki dla lasów północno-wschodniej Europy – $5\text{--}10 \text{ kg ha}^{-1}$

rok^{-1} (MANNINEN i współaut. 1997). Średnia depozycja całkowita azotu w Puszczy Białowieskiej składała się tylko w 28% z depozycji suchej i aż w 72% z depozycji mokrej i w 2001 r. wynosiła 11 kg ha^{-1} . Przyjęty na świecie poziom krytycznego obciążenia lasów azotem wynosi 15 do $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$ dla lasów gospodarczych, ale tylko 2 do 5 kg dla lasów zbliżonych do naturalnych (GRODZIŃSKA i SZAREK 1995). Obciążenie azotem lasów Puszczy Białowieskiej, dużo niższe od przeciętnego obciążenia lasów europejskich, przekraczało jednak wartość krytyczną dla lasów naturalnych o co najmniej $6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ rok}^{-1}$.

Proporcje udziału różnych form depozycji siarki i azotu w Puszczy są zgodne z wynikami badań modelowych, które wykazały zależność względnego udziału suchej i mokrej depozycji w depozycji całkowitej od charakterystyki obszaru (WHELPDALE i współaut. 1997). Przy ocenie globalnych depozycji kwaśnych ustalono, że w Europie sucha depozycja stanowi 20–70% całkowitej depozycji siarki i 15–50% całkowitej depozycji azotu, przy czym udział tej depozycji z reguły maleje wraz ze wzrostem odległości od silnych źródeł emisji.



Ryc. 3. Depozycja całkowita siarki i azotu w Puszczy Białowieskiej w latach 1986–2001.

Równie ważna jak ocena aktualnego poziomu zanieczyszczenia powietrza, jest ocena kierunku jego zmian, na podstawie której można byłoby prognozować zagrożenie środowiska

przyrodniczego w następnych latach. Optymizmem napawa istotne zmniejszanie się depozycji całkowitej siarki, wynikające głównie z regularnego spadku depozycji suchej. Z pewnością przyczyną takiego trendu jest modernizacja wielu kotłowni w Białowieży i Hajnówce w ostatnich latach, polegająca na zamianie surowców energetycznych, z węgla i koksu, na olej opałowy lub gaz. Depozycja całkowita azotu w takiej samej sytuacji nie zmniejszała się prawdopodobnie z powodu rosnącego natężenie lokalnego ruchu samochodowego. Kierunek zmian depozycji związków siarki i azotu w Puszczy był zgodny z trendami zmian emisji i

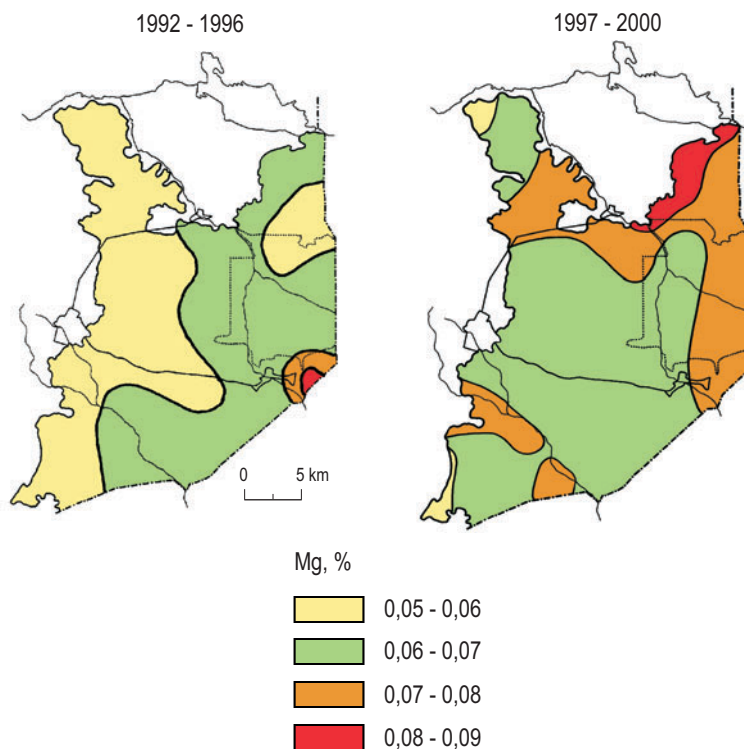
depozycji tych pierwiastków w Europie (BERGE i współaut. 1999). Od 1985 do 1995 r. emisja siarki zmniejszyła się o 39%, azotu utlenionego o 10% i zredukowanego o 18%. Spowodowało to obniżenie depozycji odpowiednio o 34,9 i 12%. Szczególnie gwałtowne obniżenie emisji siarki w Polsce miało miejsce w latach 1989–1990 i było związane z recesją gospodarczą. Od 1991 r. tempo spadku emisji siarki wyraźnie zmalało. Natomiast emisja azotu zmniejszała się do 1992 r., po czym po krótkim okresie stabilizacji pojawił się niewielki wzrost emisji od 1994 r.

MONITORING BIOLOGICZNY

Do oceny poziomu zanieczyszczenia środowiska leśnego Puszczy Białowieskiej służy od 1988 r. monitoring biologiczny, w którym jedną z metod jest prowadzona corocznie na 75 stałych powierzchniach bioindykacyjnych analiza zmian składu chemicznego wybranych bioindykatorów roślinnych, w tym mchu rokitnika pospolitego *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. i 2-letnich igieł sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* L., której leśnicy przypisują największą wartość diagnostyczną w ocenie zagrożenia środowiska leśnego (MALZAHN 1999, 2001). Analizowane zawartości makropierwiastków oraz 8 metali ciężkich w bioindykatorach są porównywane z zakresami normalnych i toksycznych ich zawartości w roślinach.

Makropierwiastki (N, P, K, Ca, Mg) są niezbędne do prawidłowego przebiegu podstawowych funkcji fizjologicznych w roślinach. Poziom ich zawartości świadczy o stopniu odżywienia, a niedobory o niedostatecznej ich zawartości w glebie lub o degradacji środowiska, spowodowanej głównie przez jego zanieczyszczenie, będące przyczyną pierwotną. Także zawartości powyżej fizjologicznego maksimum niektórych makropierwiastków (np. azotu) w aparacie asymilacyjnym drzew są tłumaczone wpływem zanieczyszczeń powietrza (DE VRIES i HEIJ 1991). Średnie zawartości makropierwiastków w 2-letnich igłach sosny mieszczą się w granicach klasy 2, w trzyklasowej skali zawartości makropierwiastków w igłach sosny uznawanej przez Centrum Koordynacyjne do spraw chemizmu aparatu asymilacyjnego, działającego w ramach ICP-Forest (FOREST FOLIAR CONDITION IN EUROPE 1997). Zaopatrzenie w składniki pokarmowe drzew

jest więc wystarczające, chociaż niepokoi malejąca zawartość azotu, fosforu i cynku w igłach sosny. W ostatnich latach wzrosła natomiast zawartość magnezu, która groźnie zmniejszała się do 1995 r., zwłaszcza w zachodniej części Puszczy (Ryc. 4). Tę tendencję należy ocenić pozytywnie ze względu na bardzo istotną ujemną korelację pomiędzy zawartością magnezu w igłach a poziomem defoliacji drzew, czyli degradacji ich aparatu asymilacyjnego. W ostatnich latach najlepiej zaopatrzone w magnez są sosny w północno-wschodniej części Puszczy, w tym także w Białowieskim Parku Narodowym. Według zawartości siarki w igłach, cały obszar Puszczy ciągle można zaliczyć do strefy mało zanieczyszczonej (0,09% do 0,12%) (MOLSKI i DMUCHOWSKI 1986). Dużą wartość diagnostyczną mają prawidłowe stosunki pomiędzy makropierwiastkami w aparacie asymilacyjnym drzew (Ryc. 5). Stosunek N:P w igłach sosny wynosił średnio 9,6. Czasem przekraczał wartość 10, ale w żadnym roku nie przekroczył wartości 11, uznawanej w literaturze za krytyczną, wskazującą na możliwość uszkodzenia igieł sosny na skutek nadmiernego nawożenia azotem lub zmniejszenia stężenia fosforu w warunkach silnego zakwaszenia. Stosunek N:K istotnie zmniejszał się, wynosił średnio 2,7 i był zawsze niższy od krytycznej wartości 3,5 świadczącej o naruszeniu równowagi pomiędzy tymi pierwiastkami w igłach. Stosunek N:S, który w igłach sosny na obszarze kraju waha się w granicach 8–16 i w najmniej zanieczyszczonej strefie (północno-wschodnia Polska) wynosił na początku lat 90. 12–14 (DMUCHOWSKI i WAWRZONIAK 1994), w Puszczy wynosił średnio 13,8 i charakteryzował się



Ryc. 4. Rozkład przestrzenny zawartości magnezu w 2-letnich igłach sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* w Puszczy Białowieskiej w latach 1992–2000.

istotnym trendem malejącym. Najbardziej korzystnym trendem jest zmniejszanie się od 1994 r. stosunku N:Mg w igłach. A więc w podsumowaniu można stwierdzić, że zaopatrzenie w pierwiastki odżywcze drzew w Puszczy w ostatnich latach wykazało oznaki poprawy, co także ma wpływ na zmniejszanie się kumulacji metali ciężkich. Sumaryczna zawartość metali w igłach była bowiem istotnie ujemnie skorelowana z zawartością w nich azotu, fosforu, magnezu i cynku.

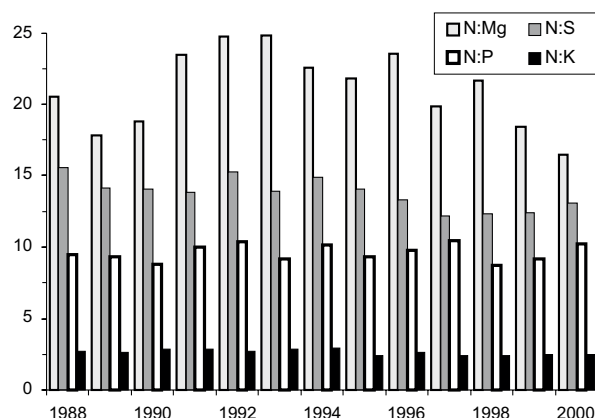
Zawartość metali ciężkich w roślinach badana jest pod kątem zapotrzebowania roślin na metale, które spełniają ważne funkcje fizjologiczne (np. żelazo, miedź, cynk) oraz wpływu

nadmiaru metali na rośliny w związku z postępującym skażeniem środowiska (KABATA-PENDIAS i PENDIAS 1993). Kierunek zmian zanieczyszczenia środowiska leśnego można prześledzić na przykładzie kumulacji metali ciężkich przez organizmy bioindykacyjne. Jednym z gatunków łatwo kumulujących metale jest mech *Pleurozium schreberi*, używany do badań w Puszczy przez kilku autorów w ciągu ostatnich 25 lat (Ryc. 6). Istotne prostoliniowe trendy malejące zawartości większości metali w mchu świadczą o ciągłym zmniejszaniu się zanieczyszczenia środowiska leśnego metalami ciężkimi.

PROGNOZY ZAGROŻEŃ I ZANIECZYSZCZENIA ŚRODOWISKA LEŚNEGO

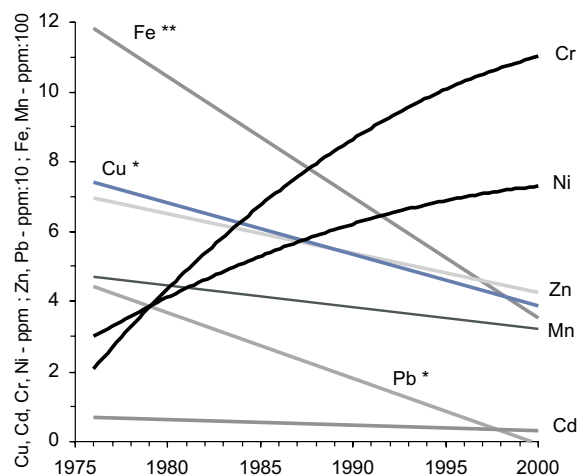
W latach 1988–2000 stwierdzono dużo istotnych korelacji dodatnich i ujemnych pomiędzy różnymi wskaźnikami zanieczyszczeń powietrza a składem chemicznym bioindykatorów. Więcej istotnych korelacji pomiędzy zanieczyszczeniami powietrza a zawartością metali ciężkich zarejestrowano w igłach sosny niż w mchu, co może być związane z różnym sposobem ich kumulacji. W igłach sosny stwierdzono istotne korelacje dodatnie pomiędzy zawartością wapnia i ołowiu a kwasowością opa-

dów atmosferycznych oraz pomiędzy zawartością azotu, fosforu, żelaza i sumarycznego indeksu zawartości metali ciężkich a depozycją siarki. Główne istotne dodatnie korelacje zawartości metali w mchu były związane z opadem pyłów. Depozycja azotu była mniej skorelowana ze składem chemicznym bioindykatorów niż depozycja siarki. W Puszczy Białowieskiej wyjątkowo duży udział w depozycji całkowitej azotu stanowi depozycja mokra (72%). Prawdopodobnie w zwartych kompleksach le-



Ryc. 5. Zmienność stosunków pomiędzy niektórymi makropierwiastkami w 2-letnich igłach sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* w Puszczy Białowieżskiej w latach 1988–2000.

śnych niektóre parametry meteorologiczne, takie jak m.in. małe prędkości wiatrów, duża wilgotność względna i mała przewiewność ich obszaru, mogą sprzyjać zwiększonemu udziałowi depozycji mokrej.



Ryc. 6. Trendy zmian zawartości metali ciężkich w mchu *Pleurozium schreberi* w Puszczy Białowieżskiej w latach 1976–2000.

Trendy prostoliniowe istotne statystycznie przy * $P < 0.01$; ** $P < 0.001$. (wg GRODZIŃSKIEJ 1978, GRODZIŃSKIEJ i współaut. 1990, MALZAHN 1999; uzupełnione).

Na zmniejszanie się zagrożeń i zanieczyszczenia środowiska w ostatnich latach w Puszczy Białowieżskiej mogły mieć też wpływ korzystne dla środowiska leśnego zmiany niektórych czynników klimatycznych. Istotnie

zmniejszał się roczny przedział wahań temperatury z ponad 40°C w latach 1986–1987 do $31,4^{\circ}\text{C}$ w latach 1996–2000. W róży wiatrów zmniejszał się udział wiatru z kierunku zachodniego i południowo-zachodniego, a zwiększał udział wiatru z kierunku południowo-wschodniego. Liczba dni z ciszą w roku zmniejszyła się z 26 w latach 1986–1990, do 4 w latach 1996–2001.

Prognoza zagrożenia środowiska leśnego Puszczy Białowieżskiej przez zanieczyszczenia powietrza w nadchodzących latach, uwzględniająca krajowe i europejskie prognozy redukcji emisji zanieczyszczeń do 2010 r., przewiduje dalsze obniżanie się poziomu depozycji całkowitej siarki i opadu pyłów, ale utrzymanie się lub nawet wzrost poziomu depozycji całkowitej azotu. Może to powodować tylko efekt nawożenia, czyli eutrofizację siedlisk leśnych, co jednak prowadzi także do przenoszenia produkcji biomasy z korzeni do części nadziemnych drzew i może być przyczyną większej wrażliwości drzewostanów na naturalne stresy środowiskowe. Może też być przyczyną szkodliwego efektu zakwaszenia siedlisk leśnych, zwłaszcza w niekorzystnych warunkach klimatycznych (SOKOŁOWSKI 1991). Systematyczny wzrost zakwaszenia siedlisk leśnych jest z niepokojem rejestrowany od wielu lat w zachodniej Europie i Skandynawii, a wynikające z tego zakłócenie bilansu pokarmowego w glebie i roślinach uważa się za poważne zagrożenie dla normalnego funkcjonowania lasu.

Czasowa i przestrzenna zmienność stężeń zanieczyszczeń atmosferycznych w Puszczy Białowieżskiej dotyczy rejonu oddalonego od wielkich ośrodków przemysłowych i szlaków komunikacyjnych, ale pozostającego w dalszym ciągu w zasięgu oddziaływania zanieczyszczeń transgranicznych. Poziom zanieczyszczenia powietrza w Puszczy Białowieżskiej pozostanie w następnych latach w ścisłym związku z charakterem klimatu Polski i usytuowaniem w polu emisji zanieczyszczeń w Europie. Wyniki monitoringu stanu środowiska leśnego Puszczy Białowieżskiej powinny być wykorzystywane w przygotowywaniu każdej wersji poszukiwanej od kilku lat najwłaściwszej formy ochrony jej zasobów przyrodniczych. Jednocześnie powinny stanowić punkt odniesienia dla silnie zagrożonych przez zanieczyszczenia powietrza Parków Narodowych, zwłaszcza w południowej części kraju.

THE MONITORING OF THREAT TO AND POLLUTION OF THE FOREST ENVIRONMENT IN BIAŁOWIEŻA PRIMEVAL FOREST

S u m m a r y

Partial results of a comprehensive monitoring research carried out over the whole Białowieża Primeval Forest, conducted by Forest Research Institute, Natural Forest Department in Białowieża in the years 1986–2001, are presented. As a measure of potential threats the level, direction of changes and spatial distribution of dry and wet air pollution (technical monitoring) were used. The measure of bioindicators response to changes in the environment is the estimation of the level of macroelements and cumulation of sulphur and heavy metals in chosen plant bioindicators (two-year-old needles of *Pinus sylvestris* L. and moss *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. (biolog-

ical monitoring). The relations between chemical composition of bioindicators and variability of air pollution and climate conditions were looked for.

The present level of air pollution in Białowieża Primeval Forest is low. Despite changes in quality and total sulphur and nitrogen deposition and the prognosis of reduction of pollutants' emission up to the year 2010, the forest environment is threatened by increasing acidity. The spatial distribution of biotic and abiotic parameters over the whole area of Białowieża Primeval Forest allowed to conclude that the threat is the lowest in Białowieża National Park.

LITERATURA

- BERGE E., BARTNICKI J., OLENDZYNSKI K., TSYRO S.G., 1999. *Long-term trends in emissions and transboundary transport of acidifying air pollution in Europe*. J. Environ. Manag. 57, 31–50.
- DMUCHOWSKI W., WAWRZONIAK J., 1994. *Spatial distribution of sulphur and nitrogen content in needles of Scots pine (Pinus sylvestris L.) as related to air pollution and tree stands vitality in Poland*. [W:] *Climate and Atmospheric Deposition Studies in Forests*. SOLON J., ROO-ZIELIŃSKA E., BYTNEROWICZ A. (red.). Conference Papers IGSO PAS, Warszawa, 19, 177–186.
- DE VRIES W., HEIJ G. J., 1991. *Critical loads and critical levels for the environmental effects of air pollution*. [W:] *Dutch priority programme on acidification*. HEIJ G. J., SCHNEIDER T. (red.). Re no. 200-09. Nationale Institute of Public Health and Environmental Protection. Bithoven (Netherlands), 180–190.
- DOBROWOLSKI M., LECH P., KLUZIŃSKI L., KOLK A., SIEROTA Z., WAWRZONIAK J., WÓJCIK J., ZAŁĘSKI A., 2001. *Stan uszkodzenia lasów w Polsce w 2000 roku na podstawie badań monitoringowych*. Biblioteka Monitoringu Środowiska Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 1–244.
- FOREST FOLIAR CONDITION IN EUROPE, 1997. Forest Foliar Coordinating Centre in cooperation with the Austrian Federal Forest Research Centre, EC-UN/ECE-FBV A, Brussels, Geneva, Vienna.
- GRODZIŃSKA K., 1978. *Mosses as bioindicators of heavy metal pollution in Polish National Parks*. Water, Air Soil Pollut. 9, 83–97.
- GRODZIŃSKA K., SZAREK G., 1995. *Skażenie środowiska Polski na tle Europy*. Wiad. Bot. 39, 31–38.
- GRODZIŃSKA K., SZAREK G., GODZIK B., 1990. *Heavy metal deposition in Polish National Parks – changes during ten years*. Water, Air Soil Pollut. 49, 409–419.
- KABATA-PENDIAS A., PENDIAS H. 1993. *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. PWN, Warszawa, 1–364.
- MALZAHN E., 1999. *Ocena zagrożeń i zanieczyszczenia środowiska leśnego Puszczy Białowieskiej*. Prace Inst. Bad. Leśn., Seria A, 885, 1–177.
- MALZAHN E., 2000. *Kwaśne deszcze w Puszczy Białowieskiej jako kryterium zagrożenia środowiska leśnego*. Prace Inst. Bad. Leśn., Seria A, 4, 906, 54–72.
- MALZAHN E., 2001. *Założenia metodyczne i program monitoringu środowiska leśnego Puszczy Białowieskiej*. Biuletyn Monitoringu Przyrody 1, 25–36.
- MANNINEN S., HUTTUNEN S., KONTIO M., 1997. *Accumulation of sulphur in and on Scots pine needles in the subarctic*. Water, Air Soil Pollut. 95, 147–164.
- MOLSKI B. A., DMUCHOWSKI W., 1986. *Effects of acidification on forests and natural vegetation, wild animals and insects*. [W:] *Acidification and its policy implications*. SCHNEIDER T. (red.). Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York-Tokyo, 29–51.
- SOKOŁOWSKI A.W., 1991. *Zmiany składu gatunkowego zbiorowisk leśnych w rezerwach Puszczy Białowieskiej*. Ochr. Przyr. 49, 63–78.
- SZAREK-ŁUKASZEWSKA G. 1999. *Input of chemical elements to the forest ecosystem on the Carpathian Foothills (S Poland)*. Pol. J. Ecol. 47, 191–213.
- WHELPDALE D. M., SUMMERS P. W., SANHUEZA E., 1997. *A global overview of atmospheric acid deposition fluxes*. Environ. Monit. Assess., 48, 217–247.