INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 2/2011, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 261–273
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Dariusz Kayzer, Andrzej Czerniak, Agata Poszyler-Adamska

WPŁYW PIERWIASTKÓW ŚLADOWYCH NA PARAMETRY MORFOMETRYCZNE APARATU ASYMILACYJNEGO BRZOZY BRODAWKOWATEJ

EFFECT OF TRACE ELEMENTS ON THE MORPHOMETRIC PARAMETERS OF ASSIMILATION APPARATUS IN WHITE BIRCH

Streszczenie

Celem zrealizowanego projektu badawczego była weryfikacja hipotezy, iż brzoza brodawkowata jako hiperakumulator wybranych pierwiastków śladowych może znaleźć zastosowanie w remediacji gleb, pełnić rolę bioindykatora w badaniach środowiskowych oraz być gatunkiem przydatnym do nasadzeń ograniczających migrację pierwiastków śladowych do ekosystemu leśnego, bez negatywnego wpływu na swój rozwój i prawidłowe funkcjonowanie.

Badania przedstawione w artykule polegały na porównaniu parametrów morfometrycznych aparatu asymilacyjnego brzóz (*Betula pendula* Roth.) rosnących w wyizolowanej geomembraną glebie, do której wprowadzono dwie dawki pierwiastków śladowych w formach łatwo przyswajalnych.

Przeprowadzone badania nie wykazały istotnego wpływu wprowadzonych poziomów pierwiastków śladowych na stan aparatu asymilacyjnego brzozy brodawkowatej. Z uwagi na powszechne występowanie brzozy w warunkach polskich, jej łatwość do adoptowania się w środowisku o silnej antropopresji oraz małe wymagania środowiskowe, gatunek ten może być przydatny do nasadzeń w formie barier biogeochemicznych ekranizujących źródła emitujące pierwiastki śladowe (szlaki komunikacyjne, hałdy, składowiska, zakłady przemysłowe, oczyszczalnie).

Słowa kluczowe: pierwiastki śladowe, aparat asymilacyjny, brzoza, wielowymiarowa analiza wariancji

Summary

The aim of the research project was to test the hypothesis that the white birch as hyperaccumulator of selected trace elements can be used in soil remediation, that it acts as bioindicator in environmental studies and can be a useful species for planting to restrict migration of trace elements to the forest ecosystem with no adverse impact on its development and proper functioning.

The research presented in this paper relied on a comparison of the morphometric parameters of assimilation apparatus in white birch (Betula pendula Roth.) growing in an isolated geomembranes soil, which has received two doses of trace elements in easily digestible forms.

The results showed that the different levels of trace elements have the same impact on the state of assimilation apparatus birch. Given the prevalence of birch in Polish conditions, its good adoption to an environment with a strong human impact and low environmental requirements, this species may be suitable for planting in the form of biogeochemical barriers screening sources emitting trace elements (routes, dumps, landfills, industrial plants, sewage treatment plant).

***Key words**: trace elements, assimilatory apparatus, white birch, multivariate analysis of variance*

WSTĘP

Warunkiem trwałego istnienia ekosystemu leśnego jest równowaga głównych procesów przemian materii. Każda istotna zmiana chemicznej równowagi w środowisku powoduje zakłócenie homeostazy, sukcesję ilościową i jakościową poszczególnych komponentów świata roślinnego i zwierzęcego, a w konsekwencji degradację naturalnego środowiska przyrodniczego. Ponieważ środowisko naturalne, w wyniku oddziaływania czynników antropogenicznych ulega ciągłemu przekształcaniu, konieczne jest prowadzenie periodycznej obserwacji i pomiarów wybranych indykatorów rejestrujących zmiany w ekosystemach leśnych.

Wszystkie pierwiastki chemiczne występujące w nadmiernych ilościach mogą stwarzać warunki stresowe dla świata ożywionego. Metale ciężkie są szczególnie aktywne i szkodliwe ze względu na specyficzną rolę, jaką spełniają w procesach biochemicznych oraz w charakterystycznych interakcjach typu synergicznego lub antagonistycznego. Toksyczność metali zależy od ich ilości i form oraz reaktywności chemicznej, czyli zdolności do tworzenia składników kompleksowych z frakcjami materii organicznej, ze związkami nieorganicznymi i żywymi organizmami poprzez biosorbcję i kumulację. Biosorpcja polega na tworzeniu wiązań metali z aktywnymi grupami związków chemicznych występujących w otoczkach, ścianach i błonach komórkowych. Kumulacja to tworzenie kompleksów wewnątrzkomórkowych.

Ocenę chemicznej jakości środowiska przyrodniczego można prowadzić poprzez obserwację wskaźników biologicznych. Bioindykatorami są na ogół

organizmy stenotopowe o wąskim zakresie tolerancji w stosunku do określonego czynnika środowiskowego. Właściwości bioindykacyjne mogą się przejawiać na poziomie cech biochemicznych i fizjologicznych komórek, cech anatomicznych i fizjologicznych tkanek i organów, cech morfologicznych, anatomicznych i biorytmicznych całych organizmów, cech troficznych i konkurencyjnych populacji i biocenoz.

Duża zawartość w środowisku glebowym danego pierwiastka lub zespołu pierwiastków powodować może zmiany fizjologiczne i morfologiczne, które z czasem mogą utrwalać się dziedzicznie. Reakcje roślin na zmiany chemicznego składu środowiska znalazły szerokie zastosowanie w prospekcji geochemicznej oraz monitoringu chemicznej jakości środowiska przyrodniczego.

Jako czuły indykator stanu środowiska przyrodniczego uznaje się aparat asymilacyjny, którego cechy (np. wielkość, masa, występowanie nekroz) mogą być skorelowane ze stanem zdrowotnym poszczególnych drzew a nawet kondycją całych drzewostanów. O szkodliwości danego metalu decyduje nie tylko jego ogólna ilość w glebie, lecz forma występowania. Formy pierwiastków w glebie decydują w znacznym stopniu o ich mobilności i przyswajalności przez rośliny i migracji biogenicznej.

Pobieranie pierwiastków śladowych z gleb przez rośliny przekracza często ich zapotrzebowanie fizjologiczne. Słabe działanie bariery fizjologicznej w roślinach powoduje bierną niemetaboliczną absorpcję i stwarza ryzyko biologicznej akumulacji i włączenia pierwiastków metalicznych w system troficzny. Absorpcja nieselektywna może być związana z procesem ewolucyjnej adaptacji roślin. Osłabienie bariery fizjologicznej może następować szczególnie szybko w przypadku działania jednocześnie kilku szkodliwych substancji podlegających interakcji synergicznej lub antagonistycznej.

Aktywne (metaboliczne) pobieranie przez systemy korzeniowe pierwiastków śladowych jest przyczyną zróżnicowania ich zawartości w częściach generatywnych i wegetatywnych roślin. Mechanizm pobierania przez rośliny nadmiernych ilości różnych pierwiastków wynika z braku bariery biologicznej i prowadzi w niektórych przypadkach do adaptacji. Rośliny o zwiększonych zdolnościach selektywnego pobierania pierwiastków mogą być wskaźnikiem stanu skażenia środowiska.

Wstępne badania wykazały, że indykatorami kumulacji zanieczyszczeń chemicznych mogą być gatunki: sosna zwyczajna (*Pinus sylvestris* L.), topola osika (*Populus tremula* L.) i brzoza brodawkowata (*Betula pendula* Roth.) [Czerniak i Kayzer 2007, Czerniak i inni 2007]

Stwierdzono także, że aparat asymilacyjny brzozy wykazuje predyspozycję do kumulowania dioksyn [Czerniak i Poszyler-Adamska 2006].

Celem zrealizowanego projektu badawczego było wytypowanie gatunków drzewiastych przydatnych do:

– fitoremediacji pierwiastków śladowych z obszarów leśnych narażonych na kumulację zanieczyszczeń,

– badań bioindykacyjnych,

– nasadzeń ograniczających migrację pierwiastków śladowych do ekosystemu leśnego.

Badania polegały na analizie różnych parametrów drzew rosnących na glebach zanieczyszczonych i porównaniu tych cech z drzewami kontrolnymi. Badano między innymi: stan zdrowotny drzew, przyrosty roczne na wysokość, stan systemów korzeniowych, masę aparatu asymilacyjnego, proces fotosyntezy. W niniejszym artykule przedstawiono badania polegające na porównaniu wielkości liści.

Celem przeprowadzonych badań była weryfikacja hipotezy, iż brzoza brodawkowata jako hiperakumulator wybranych pierwiastków śladowych może znaleźć zastosowanie w remediacji gleb, pełnić rolę bioindykatora w badaniach środowiskowych oraz być gatunkiem przydatnym do nasadzeń ograniczających migrację pierwiastków śladowych do ekosystemu leśnego, bez negatywnego wpływu na swój rozwój i prawidłowe funkcjonowanie.

Uzyskane wyniki i obserwacje będą mogły znaleźć zastosowanie przy projektowaniu i doborze właściwej struktury gatunkowej barier biogeochemicznych czyli zadrzewień ekranizujących źródła zanieczyszczeń.

METODY BADAŃ

Sposób założenia doświadczenia polowego.

Najczęściej badania toksyczności pierwiastków śladowych prowadzi się w doświadczeniach wazonowych na roślinach próbnych. W przypadku drzew, metody wazonowe nie są możliwe do zastosowania. Opracowana metoda własna polegaja na dozowaniu pierwiastków śladowych do gleby odizolowanej od środowiska nieprzepuszczalną membraną. Doświadczenie polowe założono w listopadzie 2006 roku na terenie Leśnego Zakładu Doświadczalnego Murowana Goślina, w Leśnictwie Kamińsko. Metodami geodezyjnymi wyznaczono lokalizację kołowych powierzchni doświadczalnych. Sposób wykonania powierzchni doświadczalnych polegał na wykopaniu 16 powierzchni kołowych o średnicy 2 metrów i głębokości 0,5 metra.

Dno każdej powierzchni odizolowano od środowiska glebowego nieprzepuszczalną geomembraną, w celu uniknięcia migracji pionowej i poziomej wprowadzonych pierwiastków śladowych. Zastosowana polietylenowa geomembrana cechuje się wysoką gęstością, a jej wysoka odporność na degradację biologiczną oraz mechaniczną zapewnia utrzymanie stałych i kontrolowanych warunków doświadczenia. Tym sposobem zamknięto obieg metali w układzie: odizolowana gleba - roślina.

Założono trzy powierzchnie doświadczalne: A i B zróżnicowane pod względem sumarycznej wprowadzonej dawki pierwiastków śladowych oraz

powierzchnie kontrolną (K). Dno każdej kołowej powierzchni doświadczalnej wyłożono warstwą drenażową (piasek średni) o miąższości 0,04m. Na głębokości 0,3 metra, do warstwy gleby organicznej wprowadzono uwodnione sole pierwiastków śladowych. Pierwiastki śladowe w glebie występują w zmiennych ilościach, a ich zawartości ogólne nie odzwierciedlają potencjalnej dostępności oraz zagrożenia dla roślin. W celu nadania im form najlepiej przyswajalnych przez rośliny, sole rozpuszczono w wodzie. Chrom wprowadzono w postaci $Cr(SO_4)_3 \times 18H_2O$, cynk – $ZnCl_2 \times 6H_2O$, miedź – $CuSO_4 \times 5H_2O$, ołów – $Pb(CH_3COO)_2 \times 3H_2O$, nikiel – $NiCl_2 \times 6H_2O$, kobalt – $CoSO_4 \times 7H_2O$ oraz kadm – $CdCl_2 \times 2½H_2O$.

Dawki wprowadzonych metali śladowych zostały ustalone w oparciu o dopuszczalne wartości stężeń w glebie lub ziemi obowiązujące w Polsce, przedstawione w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi. W badaniach zastosowano sumaryczną masę pierwiastka równorzędną 10% dopuszczalnej wartości stężeń dla obszarów kategorii B i C. Zastosowana 10% ilość poszczególnych pierwiastków śladowych wynika z faktu, iż w Rozporządzeniu dopuszczalne stężenia są wartościami całkowitymi pierwiastka, natomiast badania [Czekała 1997; Czerniak 2004] wskazują iż wartości przyswajalne pierwiastków śladowych występują w glebie na poziomie 10%. Wielkości wprowadzonych dawek pierwiastków zawarto w tabeli 1.

Tabela 1. Zawartości pierwiastków śladowych wprowadzonych do gleby, z podziałem na doświadczenie A i B

Lp.	Pierwiastek	Stężenie pierwiastka (mg/kg s.m.)	
		A	B
1	Cr	15,00	50,00
2	Zn	32,50	100,00
3	Cd	0,45	1,50
4	Co	2,50	20,00
5	Cu	12,50	60,00
6	Ni	7,50	30,00
7	Pb	10,00	60,00

Wiosną 2007 roku każdą z powierzchni kołowych obsadzono 7 sztukami dwuletnich sadzonek brzozy brodawkowatej (*Betula pendula* Roth).

Aparat asymilacyjny pobierano losowo w połowie września w latach: 2007, 2008 i 2009. Zebrane liście zasuszano, a następnie skanowano w rozdzielczości 4800×9600 dpi. Pomiar zeskanowanych liści (górne strony blaszek liściowych) wykonano przy użyciu programu komputerowego DigiShape, umożliwiającego morfometryczną analizę 34 cech u obiektów sylwetkowych [Moraczewski 2005].

Analizie statystycznej poddano 5 podstawowych parametrów:

– LengthMER (L) - długość obiektu obliczona wg tzw. najmniejszego prostokąta zamykającego (*minimum enclosing rectangle*). Najmniejszy prostokąt zamykający to prostokąt zawierający obiekt i stykający się z nim bokami. Dłuższy bok prostokąta jest równoległy do tzw. głównego (dłuższego) wektora własnego. Dłuższy (główny) wektor własny to kierunek, w którym figura jest najbardziej rozciągnięta,

– WidthMER (W) - szerokość obiektu obliczona wg tzw. najmniejszego prostokąta zamykającego,

– Perimeter (P) - obwód obiektu (długość konturu), liczony wg rzeczywistego obwodu obiektu lub po wygładzeniu wielomianami trzeciego stopnia,

– Area (AR) - pole powierzchni obiektu,

– LengthDiam (LD) - długość średnicy, czyli odcinek łączący dwa najbardziej oddalone od siebie punkty konturu.

Model matematyczny.

Do porównania parametrów morfometrycznych liści brzozy brodawkowatej pobranych z drzewek rosnących na kołowych powierzchniach doświadczalnych zastosowano metodę wielowymiarowej analizy wariancji dla klasyfikacji dwukierunkowej [Morrison 1967, Seber 1980, Krzyśko 2000]. Przez $\mathbf{y}_{j,k,l}$ oznaczono 5×1 wymiarowy wektor wartości parametrów morfometrycznych liści brzóz (długość, szerokość, powierzchnia, obwód oraz szerokość konturu) rosnących na powierzchniach z glebą zawierającą j-tą dawką pierwiastków śladowych (j=1,2,3 czyli z powierzchni: A, B i K) pobranych w k-tym roku wegetacyjnym (k=1,2,3, czyli w latach: 2007, 2008 i 2009) w l-tym powtórzeniu (l=1,...,$N_{j,k}$). Przez $N = \sum_j \sum_k N_{j,k}$ oznaczono liczbę wszystkich badanych liści brzozy brodawkowatej. Wielowymiarowy model liniowy można wówczas zapisać w postaci:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{1}_N \boldsymbol{\mu}' + \mathbf{X}_1 \boldsymbol{\alpha} + \mathbf{X}_2 \boldsymbol{\beta} + \mathbf{X}_{12} \boldsymbol{\gamma} + \mathbf{e}, \tag{1}$$

gdzie

$\mathbf{Y} = \left[\mathbf{y}_{1,1,1},\ldots,\mathbf{y}_{1,1,N_{1,1}},\mathbf{y}_{2,1,1}\ldots,\mathbf{y}_{3,3,N_{3,3}}\right]'$ jest $N \times 5$ wymiarową macierzą obserwacji,

$\boldsymbol{\mu}$ jest 5 × 1 wymiarową macierzą średnich ogólnych,

$\boldsymbol{\alpha}$ jest 3 × 5 wymiarową macierzą parametrów powiązanych z wprowadzonymi dawkami pierwiastków śladowych,

$\boldsymbol{\beta}$ jest 3 × 5 wymiarową macierzą parametrów powiązanych z latami,

$\boldsymbol{\gamma}$ jest 9 × 5 wymiarową macierzą parametrów interakcji drugiego rzędu,

$\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \mathbf{X}_{12}$ są macierzami układu doświadczalnego,
$\mathbf{e}$ jest $N \times 5$ wymiarową macierzą błędów.

Model (1) następnie przedstawiono w następującej postaci:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{X}\boldsymbol{\Xi} + \mathbf{e}, \tag{2}$$

gdzie $\mathbf{X} = [\mathbf{1}_N \vdots \mathbf{X}_1 \vdots \mathbf{X}_2 \vdots \mathbf{X}_{12}]$ oraz $\boldsymbol{\Xi}' = [\boldsymbol{\mu} \vdots \boldsymbol{\alpha}' \vdots \boldsymbol{\beta}' \vdots \boldsymbol{\gamma}']$. Ponadto najlepszym estymatorem liniowym $\hat{\boldsymbol{\Xi}}$ otrzymanymi metodą najmniejszych kwadratów jest $\hat{\boldsymbol{\Xi}} = (\mathbf{X}'\mathbf{X})^{-}\mathbf{X}'\mathbf{Y}$ [Seber 1984], który może być zapisany w następującej postaci $\hat{\boldsymbol{\Xi}} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{7\times 5} \\ \hat{\boldsymbol{\Xi}}_{12} \end{bmatrix}$, gdzie $\hat{\boldsymbol{\Xi}}_{12} = (\mathbf{X}'_{12}\mathbf{X}_{12})^{-1}\mathbf{X}'_{12}\mathbf{Y}$ [Kayzer i Czerniak 2008]. Macierz $\hat{\boldsymbol{\Xi}}_{12}$ reprezentuje przeciętne oceny parametrów morfometrycznych liści brzozy brodawkowatej dla poszczególnych obiektów doświadczalnych (powierzchnie z wprowadzonymi dawkami pierwiastków śladowych w poszczególnych latach).

Rozważano hipotezę $H_0 : \mathbf{C}\boldsymbol{\Xi}_{12} = \mathbf{0}$, gdzie macierz $\mathbf{C} = \mathbf{I}_5 - \frac{1}{5}\mathbf{1}_5\mathbf{1}'_5$. Przy zastosowaniu hipotezy H_0 testowano, czy wartości efektów obiektowych są równe zero tzn. czy średnie wartości parametrów morfometrycznych liści brzozy brodawkowatej dla poszczególnych obiektów doświadczalnych pomniejszone o średnią obiektową są równe zero. Hipotezę H_0 testowano stosując statystykę Lawleya – Hotelinga [Anderson 2003], a następnie testowano, które elementy macierzy $\mathbf{C}\hat{\boldsymbol{\Xi}}_{12}$ są odpowiedzialne za odrzucenie tej hipotezy [Lejeune i Caliński 2000]. Do graficznego przedstawienia rezultatów wielowymiarowych analiz efektów obiektowych zastosowano analizę zmiennych kanonicznych [Lejeune i Caliński 2000, Kayzer i inni 2009].

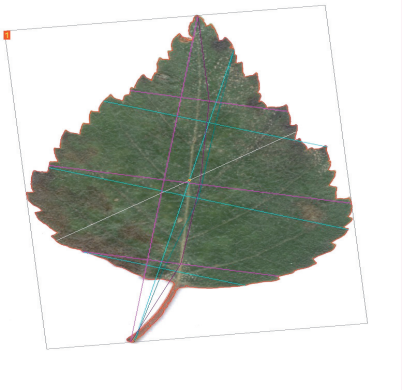
Porównania pomiędzy parametrami morfometrycznymi liści brzozy brodawkowatej pochodzących z powierzchni z wprowadzonymi pierwiastkami śladowymi, a powierzchniami kontrolnymi w poszczególnych latach analizowano badając relacje między wierszami macierzy $\hat{\boldsymbol{\Xi}}_{12}$ zwane kontrastami [Seber 1980].

Podsumowując – celem testowania było sprawdzenie, czy pierwiastki śladowe wprowadzone jednokrotnie w roku 2006 do gleb w dwóch dawkach mają wpływ na wielkość liści zebranych w latach: 2007, 2008 i 2009.

Fotografia 1. Widok na kołowe powierzchnie doświadczalne

Fotografia 2. Wyizolowana geomembraną gleba w kołowej powierzchni doświadczalnej

Fotografia 1. Widok na kołowe powierzchnie doświadczalne



Fotografia 2. Wyizolowana geomembraną gleba w kołowej powierzchni doświadczalnej

WYNIKI I DYSKUSJA

Hipotezę ogólną H_0 testowaną przy użyciu statystyki Lawleya – Hotelinga orzekającą o braku różnic między średnimi wartościami parametrów morfometrycznych w poszczególnych obiektach badawczych odrzucono ponieważ wartość empirycznego poziomu istotności *p* jest mniejsza od 0,001. Otrzymana wartość *p* bliska zeru świadczy o zróżnicowaniu wyróżnionych obiektów w odniesieniu do parametrów morfometrycznych.

W tabeli 2 przedstawiono wartości różnic pomiędzy przeciętnymi wartościami parametrów morfometrycznych liści brzozy brodawkowatej dla poszczególnych obiektów doświadczalnych, a średnimi obiektowymi (wartości efektów obiektowych). Na ich podstawie stwierdzono, że liście zebrane w poszczególnych latach różnią się. Największe liście wyrosły w roku 2007 (rok po zaaplikowaniu do gleby pierwiastków śladowych), na najmniejsze stwierdzono w roku 2008.

Tabela 2. Oceny efektów $\mathbf{C}\hat{\boldsymbol{\Xi}}_{12}$ (różnice pomiędzy średnimi wartościami parametrów morfometrycznych liści brzozy brodawkowatej, a średnią obiektową)

Obiekt doświadczalny	długość (L)	szerokość (W)	powierzchnia (AR)	obwód (P)	szerokość konturu (LD)
K_2007	7,69**	10,11**	645,4**	13,3	16,02**
A_2007	10,08**	8,30**	379,2**	98,2**	15,50**
B_2007	9,78**	10,17**	589,8**	36,8	16,46**
K_2008	-13,53**	-10,65**	-528,0**	-70,3**	-26,94**
A_2008	-14,46**	-9,02**	-547,7**	-67,9**	-26,92**
B_2008	-6,33*	-8,47**	-590,6**	-100,2**	-23,56**
K_2009	-0,20	-1,34	-33,4	-4,1	8,09**
A_2009	7,05**	4,04*	239,5*	54,8**	14,16**
B_2009	-0,08	-3,13	-154,2	39,4*	7,18**

* istotność na poziomie α=0.05.
** istotność na poziomie α=0.01.

W tabeli 3 przedstawiono porównanie między parametrami morfometrycznymi liści zebranych z powierzchni doświadczalnymi zanieczyszczonych pierwiastkami śladowymi (A i B), a liśćmi z drzewek kontrolnych (K). Na podstawie testowanych hipotez można stwierdzić, że w roku 2007, różnice wystąpiły jedynie między średnimi obwodami liści drzewek z powierzchni A i K. Analizując kontrasty dotyczące roku 2008 stwierdzono, że powierzchnia zanieczyszczona dawką B w roku 2008 różni się istotnie od powierzchni kontrolnej w odniesieniu do długości liści.

W roku 2009 zaobserwowano istotne różnice pomiędzy liśćmi drzew brzozy brodawkowatej rosnących na powierzchni doświadczalnej zanieczyszczonych dawką A, a powierzchnią kontrolną (za wyjątkiem powierzchni liścia AR). Wartości analizowanych parametrów morfometrycznych liści dla drzew rosnących na powierzchni zanieczyszczonych dawką A były większe niż dla drzew rosnących na powierzchni kontrolnej. Można to tłumaczyć prawdopodobną korzystną zmianą odczynu gleby po wprowadzeniu roztworów z pierwiastkami śladowymi. Nie stwierdzono natomiast istotnych różnic w parametrach morfometrycznych liści w roku 2009 pomiędzy powierzchnią zanieczyszczonych dawką B, a powierzchnią kontrolną.

Tabela 3. Różnice w wartościach parametrów morfometrycznych liści brzozy brodawkowatej pomiędzy powierzchniami doświadczalnymi zanieczyszczonymi pierwiastkami śladowymi.

różnica	długość (L)	szerokość (W)	powierzchnia (AR)	obwód (P)	szerokość konturu (LD)
A_2007 - K_2007	2,39	-1,81	-266,23	84,94**	-0,52
B_2007 - K_2007	2,09	0,06	-55,65	23,55	0,44
A_2007 - B_2007	0,30	-1,87	-210,57	61,40*	-0,96
A_2008 - K_2008	-0,94	1,63	-19,64	2,40	0,02
B_2008 - K_2008	7,20*	2,18	-62,59	-29,92	3,38
A_2008 - B_2008	-8,14*	-0,55	42,94	32,32	-3,36
A_2009 - K_2009	7,26*	5,39*	272,93	58,90*	6,07*
B_2009 - K_2009	0,12	-1,79	-120,77	43,49	-0,91
A_2009 - B_2009	7,13	7,18**	393,70*	15,41	6,97*

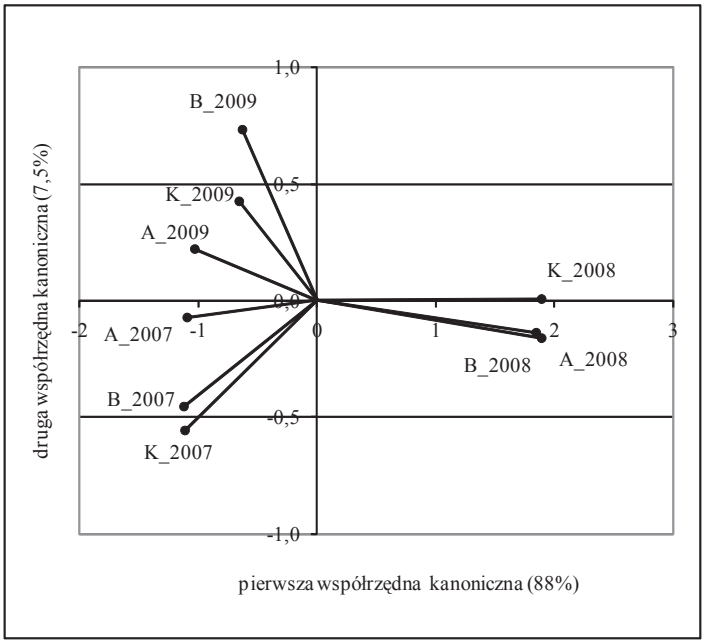
* istotność na poziomie α=0.05 ** istotność na poziomie α=0.01

Przeprowadzone analizy określające wielkość parametrów morfometrycznych liści brzozy brodawkowatej umożliwiły graficzne przedstawienie wzajemnego położenia poszczególnych obiektów doświadczalnych w przestrzeni dwóch pierwszych zmiennych kanonicznych (rys. 1). Można zaobserwować, że punkty reprezentujące obiekty doświadczane analizowane w roku 2008 położone są po jednej stronie osi rzędnych, a pozostałe punkty opisujące lata 2007 i 2009 po drugiej. Wskazuje to, że obiekty doświadczalne z roku 2008 znacząco różnią się od pozostałych pod względem wielkości parametrów morfometrycznych.

Zaobserwowana zmienność aparatu asymilacyjnego wynikała prawdopodobnie z wielkości parametrów meteorologicznych występujących w analizowanych okresach wegetacyjnych (tabela 4). Najlepsze warunki do wzrostu liści pod względem wysokości opadów i temperatury wystąpiły w sezonach wegetacyjnych (od maja do sierpnia) w latach 2007 i 2009. Sezon wegetacyjny w roku 2008 charakteryzował się względnie niskimi opadami, przy wysokich wartościach temperatury co prawdopodobnie było główną przyczyną słabszego wzrostu liści brzozy brodawkowatej.

Tabela 4. Miesięczne sumy opadów atmosferycznych oraz średnie miesięczne temperatury

	Rok 2007		Rok 2008		Rok 2009	
	Suma opadów [mm]	Średnia temperatura [ºC]	Suma opadów [mm]	Średnia temperatura [ºC]	Suma opadów [mm]	Średnia temperatura [ºC]
Styczeń	74,0	4,6	76,0	2,2	10,9	-3,4
Luty	61,2	0,7	25,7	3,9	28,9	-0,4
Marzec	63,5	6,4	54,8	4,4	60,2	3,4
Kwiecień	8,0	11,2	53,9	8,9	3,2	11,0
Maj	**95,2**	**16,6**	**8,5**	**15,6**	**73,2**	**13,3**
Czerwiec	**58,7**	**20,4**	**10,6**	**20,4**	**115,6**	**15,8**
Lipiec	**79,2**	**19,6**	**49,8**	**19,9**	**94,8**	**19,2**
Sierpień	**39,0**	**19,6**	**96,0**	**18,1**	**27,9**	**18,6**
Wrzesień	28,3	13,8	17,1	12,6	40,6	14,2
Październik	23,0	8,0	81,1	8,7	57,9	6,9
Listopad	56,5	2,7	24,4	5,3	46,0	6,1
Grudzień	37,9	1,3	27,6	0,8	37,5	-1,4
od V do VIII	272,1	19,1	164,9	18,5	311,5	16,7



Rysunek 1. Rozmieszczenie obiektów doświadczalnych w przestrzeni dwóch pierwszych zmiennych kanonicznych (np. A_2007 – oznacza wyniki uzyskane w roku 2007 z powierzchni doświadczalnej z wprowadzonymi pierwiastkami śladowymi w dawce A)

Podsumowując można stwierdzić, że jakość aparatu asymilacyjnego brzozy brodawkowatej rosnącej na powierzchniach doświadczalnych najbardziej uzależniona jest od warunków meteorologicznych, które uznano jako silniejszy czynnik stresogenny od aplikowanych pierwiastków śladowych do gleby.

WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania nie wykazały istotnego wpływu pierwiastków śladowych wprowadzonych w dawkach A i B na wielkość aparatu asymilacyjnego brzóz brodawkowatych.

2. Różnice w wielkościach liści stwierdzone po porównaniu wyników z kolejnych lat mogą wskazywać, że o ich zmienności zadecydował inny czynnik niż negatywne działanie wprowadzonych stężeń pierwiastków śladowych. Prawdopodobnie najmniejsze wielkości liści w roku 2008 wynikały z relatywnie małych opadów atmosferycznych w okresie wegetacyjnym przy jednocześnie zanotowanych wysokich temperaturach powietrza.

3. Zastosowane w doświadczeniu dawki pierwiastków śladowych nie wpłynęły negatywnie na wielkość liści u brzóz. Uzyskane wyniki na powierzchniach zanieczyszczonych były zbliżone do tych, które odnotowano na powierzchniach kontrolnych.

Z uwagi na powszechne występowanie brzozy w warunkach polskich, jej łatwość do adoptowania się w środowisku o silnej antropopresji oraz małe wymagania środowiskowe, gatunek ten jest pożądany do nasadzeń ekranizujących źródła emitujące pierwiastki śladowe (szlaki komunikacyjne, hałdy, składowiska, zakłady przemysłowe, oczyszczalnie).

BIBLIOGRAFIA

Anderson T. W., *An introduction to multivariate statistical analysis*. 3-rd ed. Wiley, New York, 2003, 721 ss.

Czekała J., *Chrom w glebie i roślinie – występowanie, sorpcja i pobieranie w zależności od jego formy i dawki, właściwości środowiska i nawożenia*. Wyd. AR w Poznaniu, Rozp. Nauk, 1997, 90 ss.

Czerniak A., *Zanieczyszczenie i bioindykacja stref ekotonowych lasu mieszanego świeżego* (*LMśw*) *w zasięgu oddziaływania cementowo-gruntowych podbudów drogowych.* Rozprawy Naukowe Zeszyt 257, Roczniki AR W Poznaniu, 2004, 191 ss.

Czerniak A., Kayzer D., *Assimilatory Apparatus of White Birch* (*Betula pendula Roth.*) *in Bioindication and Phytoremediation of Trace Elements*. Polish Journal of Environmental Studies, Vol. 16, No.3B, 2007, s: 64-67.

Czerniak A., Poszyler-Adamska A., *Zawartość dioksyn i metali ciężkich w aparacie asymilacyjnym sosny zwyczajnej* (*Pinus sylvestris L.*) *i brzozy brodawkowatej* (*Betula pendula Roth.*) *rosnących w sąsiedztwie lokalnego składowiska odpadów*. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, nr 515, Wydział Nauk Rolniczych, Leśnych i Weterynaryjnych PAN, 2006, s: 47-54.

Czerniak A., Kayzer D., Górna M., *Ocena predyspozycji aparatu asymilacyjnego topoli osiki* (*Populus tremula* L.) *do akumulacji pierwiastków śladowych*. Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych nr 31. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa, 2007, s: 215-219.

Kayzer D., Czerniak A., *Comparison of Scots pine* (*Pinus sylvestris L.*) *and White birch* (*Betula pendula Roth.*) *in terms of the accumulation of heavy metals in the assimilatory apparatus. XVIII Summer school of biometrics*, Biometrical methods and models in agricultural science, research and education, Book of proceedings, Nitra, 2008, s: 191-198.

Kayzer D. Borowiak K., Budka A., Zbierska J., *Study of interaction in bioindication research on tobacco plant injuries caused by ground level ozone*, Environmetrics 20, , 2009, s. 666-675.

Krzyśko M., *Wielowymiarowa analiza statystyczna*. Wydawnictwo Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza, Poznań, 2000, 353 ss.

Lejeune M., Caliński T., *Canonical analysis applied to multivariate analysis of variance*. Journal of Multivariate Analysis 72, 2000, s.100-119,.

Morrison D. F., *Multivariate Statistical Methods*, New York, 1967, 338 ss.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi (Dz. U. nr 02.165.1359 z dnia 4 października 2002 r.).

Seber G. A. F., *The Linear Hypothesis: A General Theory,* Charles Griffin, London, 1980, 117 ss.

Seber G. A. F., *Multivariate Observations*. Wiley, New York, 1984, 686 ss.

Dr Dariusz Kayzer
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Katedra Metod Matematycznych i Statystycznych
Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań
dkayzer@up.poznan.pl

Dr hab. inż. Andrzej Czerniak prof. nadzw.
Dr inż. Agata Poszyler-Adamska
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Katedra Inżynierii Leśnej
Mazowiecka 41, 60-623 Poznań
aczerni@up.poznan.pl

Recenzent: *Prof.dr hab. Andrzej Tomek*