

AGNIESZKA PARZYCH

## Akumulacja makro- i mikroelementów w mchach Słowińskiego Parku Narodowego

Accumulation of the macro- and microelements in mosses in the Słowiński National Park

### ABSTRACT

Parzych A. 2015. Akumulacja makro- i mikroelementów w mchach Słowińskiego Parku Narodowego. Sylwan 159 (4): 345-352.

This study was carried out in the Słowiński National Park (SNP, northern Poland) in 15 Scots pine forest stands. The research objective was to analyze the content of macro- and microelements in *Pleurozium schreberi* and *Hylocomium splendens* and to compare accumulation properties of these mosses. The examined parameters characterized by diverse composition, which depended on the mosses species and location of the study plot. The nitrogen was determined by Kjedahl method, and the phosphorus by the molybdate method. The content of K, Mg, Ca, Zn, Cu, Ni, Mn, and Fe was assessed by atomic absorption spectrometry after mineralization in the mixture of 65% HNO<sub>3</sub> and 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. The content of microelements in mosses was low and indicated low abundance of forest ecosystems in the SNP as to basic nutritional components. The highest average amount of nitrogen, phosphorus, iron, manganese and copper were found in *H. splendens*, while potassium, magnesium, calcium, zinc and nickel in *P. schreberi*. The content of zinc, nickel, copper, manganese and iron in both species were within the limits of permissible values characteristic for the plants of the unpolluted areas. Relation among the determined macro- and microelements in both species constituted the following decreasing series: N>Ca>Mg>P>K>Fe>Mn>Zn>Ni>Cu (*H. splendens*) and N>Ca>Mg>K>P>Fe>Mn>Zn>Ni>Cu (*P. schreberi*). Mann-Whitney test indicated the significance of the differences in the content of N (p<0.001), K (p<0.001) and Cu (p<0.01) between in *P. schreberi* and *H. splendens*. The mosses accumulated from 641.7 to 689.3 mmol/kg of all the analyzed components, and the lower sum of the accumulated macro- and microelements was found for *P. schreberi*. Accumulation differences in the properties of the examined species of mosses primarily result from the varying demand for individual components. Relatively high participation of Mn and Fe in the sum of the measured components in both species of moss can be the evidence of excessive uptake of these elements from the soil with heavily acidic reaction of the organic and humus levels of the soils in the SNP.

### KEY WORDS

*Hylocomium splendens*, *Pleurozium schreberi*, macroelements, microelements, protected area

### ADDRESSES

Agnieszka Parzych – e-mail: parzycha1@op.pl

Zakład Chemii Środowiskowej, Akademia Pomorska; ul. Arciszewskiego 22b, 76-200 Słupsk

## Wstęp

W ekosystemach leśnych występują bardzo ściśle zależności pomiędzy poszczególnymi ich komponentami, w szczególności między glebą i roślinnością. Zmienne w czasie i przestrzeni abiotyczne czynniki ekologiczne wpływają na skład gatunkowy zbiorowisk, a także ich strukturę i skład chemiczny roślinności, która oddziałuje modyfikująco na siedlisko. Zróżnicowanie składu chemicznego pomiędzy różnymi gatunkami roślin jest odzwierciedleniem ich cech gatunkowych [Ostrowska, Porębska 2002], zaś pomiędzy poszczególnymi osobnikami tego samego gatunku wynika ze zmienności siedliska, w szczególności jego zasobności w dostępne składniki odżywcze [Pugnaire 2001]. W ekosystemach leśnych dopływ składników odżywczych do gleby następuje wraz z opadem roślinnym, którego masa i skład chemiczny zależą od poszczególnych gatunków roślin, jak również od zmiennych w czasie i przestrzeni warunków siedliskowych. Opad roślinny jest cennym źródłem pierwiastków odżywczych i odgrywa bardzo ważną rolę, zwłaszcza w ekosystemach leśnych porastających ubogie gleby bielcowe utworzone z głębokich piasków wydmyowych [Astel i in. 2009; Parzych, Trojanowski 2009; Jonczak 2011]. Istotnym źródłem makro- i mikroskładników dla mchów są również wody opadowe [Parzych i in. 2008]. Systematyczny, długotrwały dopływ opadu roślinnego i wód opadowych dostarcza wielu makro- i mikroskładników, które w istotny sposób wpływają na kształtowanie składu chemicznego gleb [Jonczak 2011] i roślinności [Parzych 2010]. Mchy czerpią składniki odżywcze głównie z opadów atmosferycznych i suchej depozycji, pobieranie z podłoża jest ograniczone ze względu na obecność chwytników, a nie korzeni. Według danych literaturowych nie należy jednak wykluczać wpływu gleby i roztworów glebowych na kształtowanie zawartości pierwiastków w komórkach ciała mchów [Økland i in. 1999; Gerdol i in. 2002]. Mchy, ze względu na nieobecność naturalnych barier ochronnych w postaci braku epidermy i kutikuli w strukturze listków, łatwo pobierają osiadające na ich powierzchni substancje, zwłaszcza pierwiastki śladowe [Grodzińska, Szarek-Łukaszewska 2001; Reiman i in. 2001; Harmens i in. 2010]. Pobieranie związków chemicznych odbywa się na zasadzie wymiany jonowej, a zawartość pierwiastków w listkach i łodyżkach mchów jest adekwatna do wielkości depozycji pobranej z powietrza. Najbardziej popularnymi gatunkami mchów, pełniącymi rolę bioindykatorów, są *Pleurozium schreberi* i *Hylocomium splendens*. Dotychczasowe międzygatunkowe porównania ich składu chemicznego wskazują na różnice w akumulacji poszczególnych pierwiastków w zielonych organach mchów. W większości przypadków wyższe stężenie niektórych z nich stwierdzono w *H. splendens*, ale tendencja taka nie została jeszcze dokładnie wyjaśniona, być może jest ona wynikiem różnic morfologicznych [Halleraker i in. 1998; Grodzińska i in. 1999; Migaszewski i in. 2009].

Celem pracy były (i) analiza zawartości wybranych makro- i mikroskładników w *Pleurozium schreberi* i *Hylocomium splendens* występujących na terenie objętym ochroną oraz (ii) porównanie właściwości akumulacyjnych tych mchów.

## Materiał i metody

Badania prowadzono w borach sosnowych Słowińskiego Parku Narodowego (SPN) w obrębie Mierzei Łebskiej (Obwody Ochronne: Rowy, Smołdziński Las, Rąbka). Obszar badań leży między 17°03' a 17°33' długości geograficznej wschodniej i między 54°37' a 54°46' szerokości geograficznej północnej. Na terenie Parku przeważają siedliska borowe (71,5%), a pozostałe siedliska to: bory mieszane (21,4%), lasy mieszane (1,6%) i lasy (5,5%). Drzewostan sosnowy na Mierzei stanowią głównie bory nadmorskie, w runie których występują przede wszystkim mchy, borówki i porosty. Wśród mszaków 36 gatunków ma status chronionych ściśle, a 20 – chronionych częściowo.

Do badań wytypowano dwa gatunki mchów – *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. i *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. – które występują niemalże we wszystkich borach sosnowych SPN. Wybrane mchy porastały gleby inicjalne luźne oraz gleby bielicowe wytworzone z głębokich piasków wydmywanych.

Do badań chemicznych pobrano zielone organy mchów (łodyżki i listki) z 15 stanowisk badawczych znajdujących się na terenie borów sosnowych suchych, świeżych i wilgotnych. Po wstępnym oczyszczeniu z mineralnych części gleby próbki suszono w temperaturze 65°C do stałej masy, a następnie homogenizowano w młynku laboratoryjnym. W próbkach oznaczono azot ogólny metodą Kiejdahla (destylarka Büchi 350K) po mineralizacji w mieszaninie 98-procentowego H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> i 30-procentowego H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Fosfor ogólny oznaczono metodą kolorymetryczną z molibdenianem amonu, a zawartość K, Mg, Ca, Zn, Fe, Cu, Ni i Mn – metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej (Aanalyst 300, Perkin Elmer) według Ostrowskiej i in. [1991] po mineralizacji w mieszaninie 65-procentowego HNO<sub>3</sub> i 30-procentowego H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Badania wykonano w oparciu o oryginalne wzorce (Merck KGaA, 1 g/1000 ml). Uzyskane wyniki odniesiono do wybranych właściwości fizykochemicznych poziomów organicznych i próchnicznych pobranych z tych samych stanowisk badawczych (tab. 1). Próbki poziomów organicznych i próchnicznych suszono do stałej masy w temperaturze 65°C, rozcierano w moździerzu i przesiewano przez sito (1 mm). W próbkach oznaczono kwasowość czynną (pH<sub>H<sub>2</sub>O</sub>), kwasowość wymienną (pH<sub>KCl</sub>) metodą potencjometryczną (CPI 551) oraz materię organiczną (OM) metodą strat żarowych w piecu muflowym w temperaturze 550°C. Zawartość ogólną pierwiastków w poziomach organicznych, próchnicznych oraz w próbkach mchów oznaczono takimi samymi metodami analitycznymi.

Normalność rozkładu koncentracji wybranych pierwiastków w mchach badano testem Shapiro-Wilka. Istotność zróżnicowania zawartości badanych pierwiastków w *Pleurozium schreberi* i *Hylocomium splendens* zweryfikowano za pomocą nieparametrycznego testu U Manna-Whitneya. Do obliczeń wykorzystano program Statistica (7.1.). Zapotrzebowanie mchów na składniki pokarmowe opisano za pomocą metody ANE (Accumulation Nutrient Elements) [Ostrowska 1987]. Sumę składników ( $Y$  [mmol/kg]) wyliczono ze wzoru:

$$Y = \sum_{i=1}^i (Z / z) \quad [1]$$

gdzie:

$Z$  – zawartość pierwiastka [mg/kg],

$z$  – masa atomowa / wartościowość jonu.

Po obliczeniu  $Y$  wyliczono procentowy udział ( $X$ ) każdego pierwiastka w tej sumie:

$$X = \frac{Z / z}{Y} \cdot 100\% \quad [2]$$

Zawartość azotu, fosforu, potasu, wapnia, magnezu, cynku, miedzi, niklu, żelaza i manganu w *Pleurozium schreberi* (*P.s.*) i *Hylocomium splendens* (*H.s.*) przeanalizowano, rozpatrując każdy składnik oddzielnie oraz w sposób zintegrowany – porównując zapotrzebowanie na podstawowe składniki odżywcze.

## Wyniki i dyskusja

Łodyżki i listki mchów charakteryzowały się zróżnicowanym składem chemicznym, który uzależniony był od gatunku oraz lokalizacji stanowiska badawczego. Zawartość makroskładników w próbkach mchów była niewielka i wskazywała na małą zasobność ekosystemów leśnych SPN

Tabela 1.

Średnia (M)  $\pm$ odchylenie standardowe (SD) oraz minimalna (min) i maksymalna (maks) wartość parametrów fizykochemicznych poziomów organicznych (Ol, Ofh) i próchnicznych (A) gleb SPN

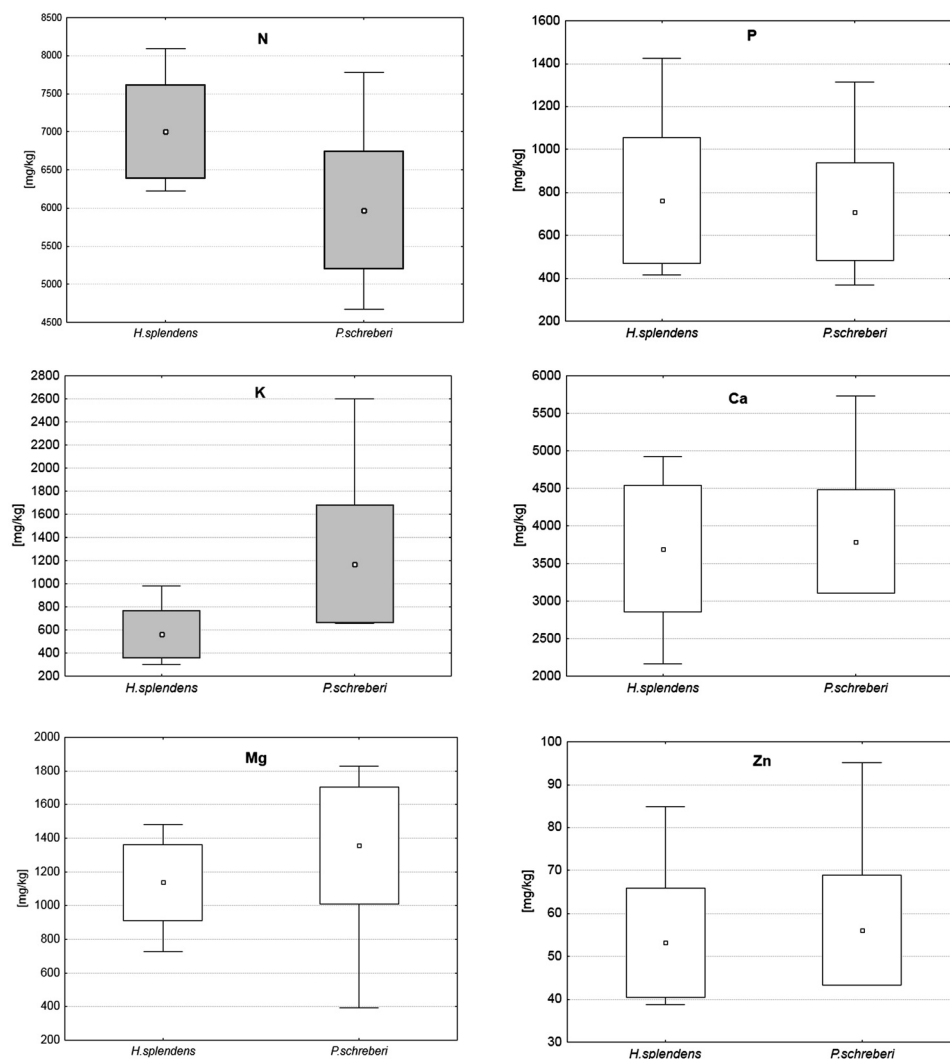
Mean (M)  $\pm$ standard deviation as well as minimum (min) and maximum (maks) value of physico-chemical properties of organic (Ol, Ofh) and humus (A) horizons of soils in SPN

		Ol	Ofh	A
pH (H <sub>2</sub> O)	M $\pm$ SD	4,4 $\pm$ 0,2	3,8 $\pm$ 0,2	4,4 $\pm$ 0,3
	min-maks	4,1-4,7	3,1-4,1	3,9-5,0
pH (KCl)	M $\pm$ SD	3,5 $\pm$ 0,2	2,8 $\pm$ 0,2	3,3 $\pm$ 0,2
	min-maks	3,0-3,8	2,5-3,1	2,9-3,6
Materia organiczna [%] Organic matter	M $\pm$ SD	96,6 $\pm$ 0,02	76,9 $\pm$ 0,2	3,1 $\pm$ 0,01
	min-maks	91,6-98,5	39,0-97,2	0,6-5,9
N [mg/kg]	M $\pm$ SD	7212 $\pm$ 1380	7417 $\pm$ 2208	251 $\pm$ 90
	min-maks	5305-9432	3242-11199	118-472
P [mg/kg]	M $\pm$ SD	419 $\pm$ 389	286 $\pm$ 113	43 $\pm$ 25
	min-maks	169-1693	150-541	11,5-97,7
K [mg/kg]	M $\pm$ SD	237 $\pm$ 111	65 $\pm$ 50,3	79 $\pm$ 37,6
	min-maks	16-411	16-215	8,4-146
Mg [mg/kg]	M $\pm$ SD	635 $\pm$ 156	565 $\pm$ 112	477 $\pm$ 106
	min-maks	457-921	457-882	308-688
Ca [mg/kg]	M $\pm$ SD	4798 $\pm$ 1594	2173 $\pm$ 841,1	310,1 $\pm$ 85,7
	min-maks	2338-7332	1052-24218	140-473
Zn [mg/kg]	M $\pm$ SD	68,9 $\pm$ 19,0	47,0 $\pm$ 15,4	2,9 $\pm$ 1,1
	min-maks	37,1-101,0	24,2-82,0	1,3-5,7
Fe [mg/kg]	M $\pm$ SD	469 $\pm$ 505	1609 $\pm$ 2161	346 $\pm$ 120
	min-maks	118-2071	478-8517	124-568
Cu [mg/kg]	M $\pm$ SD	0,80 $\pm$ 0,14	0,9 $\pm$ 0,3	0,1 $\pm$ 0,03
	min-maks	0,5-1,1	0,6-1,7	0,1-0,2
Ni [mg/kg]	M $\pm$ SD	14,3 $\pm$ 10,1	10,8 $\pm$ 8,5	0,29 $\pm$ 0,2
	min-maks	1,1-28,3	2,1-24,2	0,11-0,52
Mn [mg/kg]	M $\pm$ SD	206,2 $\pm$ 113	40,0 $\pm$ 23	4,2 $\pm$ 2,1
	min-maks	48,7-415,0	12,2-86,2	1,1-8,3

w podstawowe składniki pokarmowe. Największe średnie ilości azotu i fosforu stwierdzono w *Hylocomium splendens*, a potasu, magnezu i wapnia w *Pleurozium schreberi* (ryc. 1). Podobne właściwości akumulacyjne badanych mchów opisali Reimann i in. [2001], co potwierdza zróżnicowane zapotrzebowanie obu gatunków na makroskładniki. Spośród składników biogenicznych azot jest pobierany w największych ilościach w porównaniu do pozostałych pierwiastków, od niego zależy wzrost roślin w ekosystemach leśnych [Curtin, Wen 1999]. Stan mineralnego odżywienia roślin zależy od zawartości poszczególnych pierwiastków w tkankach oraz od ich wzajemnej równowagi [Fystro i in. 2008]. Wartość stosunku N:P (odpowiednio 9,3 w *H.s.* i 8,4 w *P.s.*) wskazuje na lepsze zaopatrzenie w azot i fosfor *H. splendens*. Według Zhiguo i in. [2007] maksymalny wzrost roślin i maksymalne zaopatrzenie w azot i fosfor występuje przy N:P zbliżającym się do 9,5. Według Townsenda i in. [2006] wartość ta jest charakterystyczna dla gatunku. Uzyskane wartości stosunku N:P w mchach SPN znajdują potwierdzenie we wcześniejszych badaniach autorki [Parzych 2010; Parzych i in. 2013].

Zawartość badanych metali ciężkich w łądkach i listkach obu gatunków mchów zawierała się w granicach wartości dopuszczalnych, charakterystycznych dla roślinności obszarów niezanieczyszczonych. Największe średnie ilości żelaza, manganu i miedzi stwierdzono w próbkach

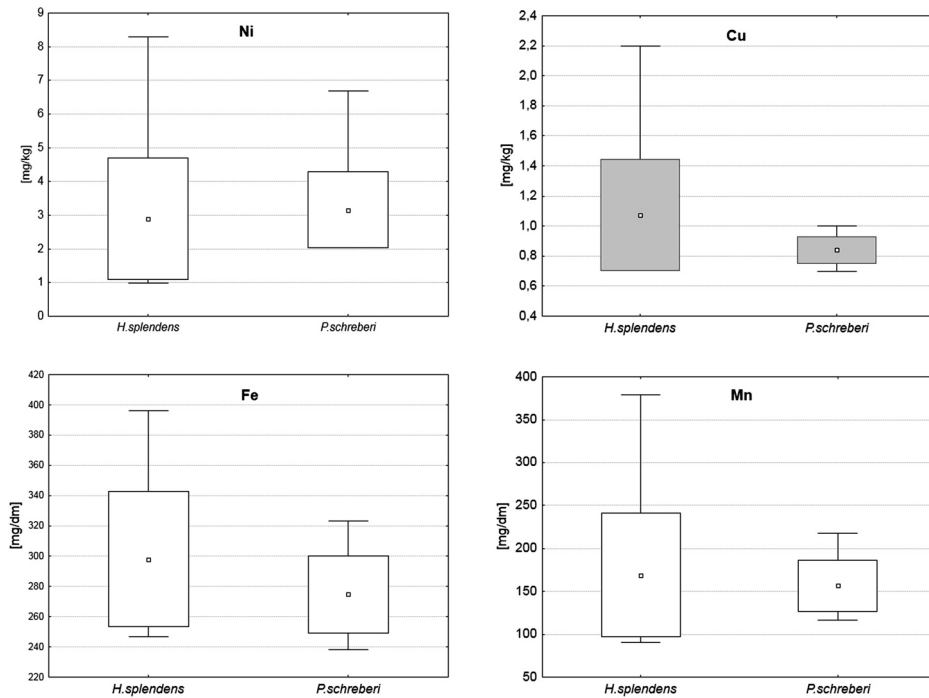
*Hylocomium splendens*, a cynku i niklu w *Pleurozium schreberi* (ryc. 2) [Parzych 2014]. Zawartość badanych metali ciężkich w obu gatunkach mchów utrzymywała się w granicach dopuszczalnych dla roślin, pokrywając jedynie ich zapotrzebowanie fizjologiczne. Zarówno cynk, nikiel, miedź i mangan, jak i żelazo są niezbędne do prawidłowego wzrostu i rozwoju roślin. Największą średnią ilość Fe, Mn i Cu stwierdzono w próbkach *Hylocomium splendens*, a Zn i Ni w *Pleurozium schreberi* (ryc. 1 i 2). Podobne relacje pomiędzy tymi gatunkami w stosunku do zakumulowanych pierwiastków przez listki i łodyżki mchów znajdują potwierdzenie w pracy Reimanna i in. [2001]. Uzyskana zawartość metali ciężkich w zielonych organach obu gatunków



Ryc. 1.

Zawartość N, P, K, Ca, Mg i Zn w zielonych organach mchów *Pleurozium schreberi* i *Hylocomium splendens*  
Content of N, P, K, Ca, Mg and Zn in the green bodies of *Pleurozium schreberi* and *Hylocomium splendens* mosses

punkt – średnia, ramka – odchylenie standardowe, wąsy – minimum i maksimum; prostokąty szare – różnica istotna przy  $p < 0,001$   
point – mean, box – standard deviation, whiskers – minimum and maximum; grey – difference significant at  $p < 0,001$



Ryc. 2.

Zawartość Ni, Cu, Fe i Mn w zielonych organach mchów *Pleurozium schreberi* i *Hylocomium splendens*

Content of Ni, Cu, Fe and Mn in the green bodies of *Pleurozium schreberi* and *Hylocomium splendens* mosses

oznaczenia jak na rycinie 1; prostokąty szare – różnica istotna przy  $p < 0,01$   
denotes as in figure 1; grey – difference significant at  $p < 0,01$

mchów jest porównywalna do tej, jaką uzyskali inni autorzy na terenie Polski [Grodzińska i in. 1999; Kozanecka i in. 2002; Migaszewski i in. 2009] i wskazuje na brak zanieczyszczenia SPN tymi metalami. Przyczynia się do tego przede wszystkim lokalizacja Parku z dala od największych źródeł emisji zanieczyszczeń. Badania pyłu zawieszonego PM10 (potencjalnego źródła metali ciężkich) prowadzone na obszarze Słowińskiego Parku Narodowego wskazują na bardzo małe zapylenie –  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  [Brożek, Zaremski 2011]. Na podstawie badań mchów i innych biowskaźników roślinnych, prowadzonych w SPN w latach 70. XX wieku i później, teren ten uznano za jeden z najczystszych w Polsce [Grodzińska i in. 1999; Grodzińska, Szarek-Łukaszewska 2001; Parzych i in. 2012].

Relacje pomiędzy zawartością badanych składników w łodyżkach i listkach mchów układały się w następujące szeregi:

*Hylocomium splendens*:  $\text{N} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{P} > \text{K} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu}$ ,

*Pleurozium schreberi*:  $\text{N} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{P} > \text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cu}$ .

Stwierdzono istotne statystycznie różnice w koncentracji azotu ( $p < 0,001$ ), potasu ( $p < 0,001$ ) oraz miedzi ( $p < 0,01$ ) w próbkach *H. splendens* oraz *P. schreberi* w borach sosnowych Słowińskiego Parku Narodowego (ryc. 1, 2). Różnice we właściwościach akumulacyjnych badanych gatunków mchów są najczęściej spowodowane zróżnicowanym zapotrzebowaniem na poszczególne składniki pokarmowe (w tym przypadku azot, potas i miedź) oraz najprawdopodobniej różnicami w budowie listków i łodyżek [Halleraker i in. 1998; Reimann i in. 2001; Migaszewski i in. 2009].

Tabela 2.

Średnia akumulacja\* oraz skład makro- i mikroelementów w zielonych organach mchów *Pleurozium schreberi* i *Hylocomium splendens*

Average of accumulation\* and structure of macro- and microelements in the green bodies of *Pleurozium schreberi* and *Hylocomium splendens*

	<i>Hylocomium splendens</i>	<i>Pleurozium schreberi</i>
Σ makro [mmol/kg], w tym:	680,0	633,0
% N	74,3	67,5
% P	3,6	3,6
% K	2,1	4,7
% Mg	7,0	9,2
% Ca	13,0	15,0
Σ mikro [mmol/kg], w tym:	9,3	8,7
% Zn	8,8	10,0
% Ni	0,5	0,6
% Cu	0,2	0,2
% Mn	33,2	33,7
% Fe	57,3	55,5
Σ makro + Σ mikro	689,3	641,7

\*wyrażona w postaci sumy składników i ich udziału w tej sumie

\*expressed as a form of an amount of these components and their participation in the total

Suma składników pokarmowych odzwierciedla całościowo tzw. czynnik żywieniowy. Badane mchy akumulowały od 641,7 do 689,3 mmol/kg makro- i mikroskładników, przy czym niższą wartość sumy zakumulowanych składników wykazywał *P. schreberi* (tab. 2). Skład pierwiastkowy sumy składników w obu gatunkach mchów był zbliżony. Udział azotu wynosił 67,5-74,3% tej sumy, fosforu 3,6%, potasu 2,1-4,7%, magnezu 7,0-9,2%, wapnia 13,0-15,0%, a mikroelementy łącznie stanowiły 1,4% – zarówno w *P. schreberi*, jak i w *H. splendens*. Na uwagę zasługuje duży udział manganu i żelaza w sumie mierzonych składników w obu gatunkach mchów, co może świadczyć o nadmiernym pobieraniu ich z gleby przez badane mchy, czemu sprzyja silnie kwaśny odczyn gleb (tab. 1).

## Wnioski

- ✦ Zawartość makroskładników w zielonych organach mchów była niewielka i wskazywała na małą zasobność poziomów organicznych i próchnicznych gleb w ekosystemach leśnych SPN w podstawowe składniki pokarmowe.
- ✦ Największą średnią ilość azotu, fosforu, żelaza, manganu i miedzi stwierdzono w próbkach *Hylocomium splendens*, a potasu, magnezu, wapnia, cynku i niklu w *Pleurozium schreberi*.
- ✦ Wykazano istotne statystycznie różnice w koncentracji azotu ( $p < 0,001$ ), potasu ( $p < 0,001$ ) oraz miedzi ( $p < 0,01$ ) w próbkach badanych mchów.
- ✦ Mchy akumulowały od 641,7 do 689,3 mmol/kg makro- i mikroskładników, przy czym niższą wartość sumy zakumulowanych składników wykazywał *Pleurozium schreberi*.
- ✦ Stosunkowo duży udział Mn i Fe w sumie mierzonych składników w łądkach i listkach obu gatunkach mchów może świadczyć o nadmiernym pobieraniu tych pierwiastków z gleby przy silnie kwaśnym odczynie poziomów organicznych i próchnicznych gleb SPN.

## Literatura

Astel A., Parzych A., Trojanowski J. 2009. Comparison of litterfall and nutrient return in a *Vaccinio uliginosi-Betuletum pubescentis* and a *Empetro nigri-Pinetum* forest stands in northern Poland. For. Ecol. Manage. 257: 2331-2341.

- Brożek A., Zarembski A. 2011. Roczna ocena jakości powietrza w województwie pomorskim. Raport za rok 2010. Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska, Gdańsk.
- Curtin D., Wen G. 1999. Organic matter fractions contributing to soil nitrogen, mineralization potential. *Soil Sci. Am. J.* 63: 410-415.
- Fystro G., Nesheim L., Bakken A. K. 2008. Phosphorus management in Nordic-Baltic agriculture-reconciling productivity and environmental protection. *NJF Report 4* (4): 51-54.
- Gerdol R., Bragazza L., Marchesini R. 2002. Element concentrations in the forest mosses *Hylocomium splendens*: variation associated with altitude, net primary production and soil chemistry. *Environ. Pollut.* 116: 129-135.
- Grodzińska K., Szarek-Łukaszewska G. 2001. Response of mosses to the heavy metal deposition in Poland – an overview. *Environ. Pollut.* 114: 443-451.
- Grodzińska K., Szarek-Łukaszewska G., Godzik B. 1999. Survey of heavy metal deposition in Poland using mosses as indicators. *The Science of the Total Environment* 229: 41-51.
- Halleraker J. H., Reimann C., Caritat de P., Finne T. E., Kashulina G., Niskavaara H., Bogatyrev I. 1998. Reliability of moss (*Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*) as bioindicators of atmospheric chemistry in the Barents region: Interspecies and field duplicate variability. *The Science of the Total Environment* 218: 123-139.
- Harmens H., Norris D. A., Steinnes E. 2010. Mosses as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: Spatial patterns and temporal trends in Europe. *Environ. Pollut.* 158: 3144-3156.
- Jonczak J. 2011. Struktura, dynamika i właściwości opadu roślinnego w 110-letnim drzewostanie bukowym z domieszka sosny i świerka. *Sylvan* 155 (11): 760-768.
- Kozanecka T., Chojnicki J., Kwasowski W. 2002. Content of heavy metals in plant from pollution-free regions. *Pol. J. Environ. Stud.* 11 (4): 395-399.
- Migaszewski Z., Galuszka A., Crook J. G., Lamothe P. J., Dołęgowska S. 2009. Interspecies and interregional comparisons of the chemistry of PAHs and trace elements in mosses *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. and *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. From Poland and Alaska. *Atmos. Environ.* 43: 1464-1473.
- Økland T., Økland R. H., Steinnes E. 1999. Element concentrations in the boreal forest moss *Hylocomium splendens*: variation due to segment size, branching patterns and pigmentation. *J. Bryol.* 19: 671-684.
- Ostrowska A. 1987. Application of ANE value and shares of individual elements in this value for determining the difference between various plant species. *Genetic aspects of plant nutrition. Plant and Soil* 27-43.
- Ostrowska A., Gawliński S., Szczubiałka Z. 1991. Metody analizy i oceny właściwości gleb i roślin. Katalog. IOŚ, Warszawa.
- Ostrowska A., Porębska G. 2002. Skład chemiczny roślin, jego interpretacja i wykorzystanie w ochronie środowiska. IOŚ, Warszawa.
- Parzych A. 2010. Azot, fosfor i węgiel w roślinności leśnej Słowińskiego Parku Narodowego w latach 2002-2005. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 43: 45-64.
- Parzych A., 2014. Heavy metals accumulation in moss *Pleurozium schreberi* (Brid.) Mitt. and *Hylocomium splendens* (Hedw.) B.S.G. in the Słowiński National Park. *J. Elem.* 2: 471-482.
- Parzych A., Astel A., Trojanowski J. 2008. Fluxes of biogenic substances in precipitation and throughfall in woodland ecosystems of the Słowiński National Park. *Arch. Environ. Prot.* 34 (2): 13-24.
- Parzych A., Jonczak J., Sobisz Z. 2013. Zawartość makro- i mikroskładników w mchach wykroscik w zespole *Empetro nigri-Pinetum ericetosum* Słowińskiego Parku Narodowego. *Słupskie Prace Biologiczne* 10: 119-131.
- Parzych A., Sobisz Z., Trojanowski J. 2012. Content of heavy metals in soil and herbaceous plants in selected of pine forest in the Słowiński National Park. *Arch. Environ. Prot.* 4 (38): 35-47.
- Parzych A., Trojanowski J. 2009. The structure and dynamics of litterfall in forest stands in the Słowiński National Park in 2003-2005. *Leś. Prace Bad.* 70 (1): 41-48.
- Pugnaire F. I. 2001. Variability of inorganic nutrient concentrations in leaves. *New Phytologist* 150: 499-507.
- Reimann C., Niskavaara H., Kashulina G., Filzmoser P., Boyd R., Volden T., Tomilina O., Bogatyrev I. 2001. Critical remarks on the use of terrestrial moss (*Hylocomium splendens* and *Pleurozium schreberi*) for monitoring of airborne pollution. *Environ. Pollut.* 113: 41-57.
- Townsend A. R., Cleveland C. C., Asner G. P., Bustamante M. M. C. 2006. Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forest. *Ecology* 88 (1): 107-118.
- Zhiguo X., Baixing Y., He Y., Changchun S. 2007. Nutrient limitation and wetland botanical diversity in northeast China: can fertilization influence on species richness? *Soil Science* 172 (1): 86-93.