

Małgorzata Rajfur<sup>1\*</sup>, Andrzej Kłos<sup>1</sup> i Maria Waclawek<sup>1</sup>

Zakład Badań Fizykochemicznych  
Samodzielna Katedra Biotechnologii i Biologii Molekularnej  
Uniwersytet Opolski  
ul. kard. B. Kominka 4, 45-032 Opole  
tel. 77 401 60 42  
\*email: mrajfur@o2.pl

## BIOAKUMULACJA METALI CIĘŻKICH W WYBRANYCH ELEMENTACH BIOTY ŁOWISKA LEŚNEGO W POKRZYWNEJ (WOJ. OPOLSKIE, PL)

### BIOACCUMULATION OF HEAVY METALS IN SELECTED ELEMENTS OF BIOTA FOREST FISHER IN POKRZYWNA (OPOLE PROVINCE, PL)

**Abstrakt:** Przedstawiono wyniki badań dotyczących akumulacji metali ciężkich: Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd i Pb przez elementy bioty: glony *Spirogyra* sp., moczarkę kanadyjską (*Elodea canadensis* Michx.) i rzęsę drobną (*Lemna minor* L.), zasiedlające wody Łowiska Leśnego w Pokrzywnej, w województwie opolskim (PL). Wyniki porównano ze stężeniami badanych analitów w wodach jeziora. Stwierdzono, że pod względem zdolności do bioakumulacji metali ciężkich badane rośliny wodne można uszeregować w kolejności: *Spirogyra* sp.  $\approx$  *Elodea canadensis* Michx. > *Lemna minor* L. Wyznaczone współczynniki bioakumulacji (BCF), będące porównaniem stężeń analitów w roślinie i w wodzie, w której wegetują, wskazują na bardzo dobre właściwości akumulacyjne badanych roślin.

**Słowa kluczowe:** *Spirogyra* sp., *Elodea canadensis* Michx., *Lemna minor* L., metale ciężkie, biomonitoring, współczynnik biokoncentracji BCF

**Abstract:** The results of investigations concerning accumulation of heavy metals: Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd and Pb in biota components: algae *Spirogyra* sp., *Elodea canadensis* Michx. and *Lemna minor* L. were shown. The samples of plants investigated were taken from waters of Forest Fishery lake in Pokrzywna, in Opole province (PL). The results were compared with concentrations of analytes determined in waters of the lake. It was found that ability of heavy metals bioaccumulation in aquatic plants can be arranged in the order: *Spirogyra* sp.  $\approx$  *Elodea canadensis* Michx. > *Lemna minor* L. Values of the calculated bioaccumulation factors (BCF), which shows ratio of analytes concentrations in plant and in water, show very good accumulation abilities of the plants' studied.

**Keywords:** *Spirogyra* sp., *Elodea canadensis* Michx., *Lemna minor* L., heavy metals, biomonitoring, bioconcentration factor BCF values

Zgodnie z Dyrektywą 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r., ustanawiającej ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej (DzU WE L 327 z 22.12.2000, s. 1) w ustawodawstwie polskim wprowadzono zmiany dotyczące sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych [1] oraz form i sposobu prowadzenia monitoringu jednolitych części wód powierzchniowych i podziemnych [2]. Jednym z elementów nowego sposobu klasyfikacji jest ocena stanu ekologicznego wód powierzchniowych, polegająca m.in. na rozpoznaniu obecności i liczności fitoplanktonu, fitobentosu oraz makrofitów zasiedlających badane wody.

Oprócz cech wskaźnikowych organizmy te mają zdolność do akumulacji zanieczyszczeń, szczególnie metali ciężkich [3]. Opisane w literaturze badania prowadzone

z wykorzystaniem roślin wodnych wskazują na ich praktyczne zastosowanie np. do biomonitoringu zanieczyszczenia wód powierzchniowych [4-12], a także w fitoremediacji [13, 14].

Badania biomonitoringowe z wykorzystaniem glonów prowadzono m.in. w Brazylii (monitorowano wody Zatoki Sepetiba [15-17], Zatoki Guanabara i Zatoki Ribeira [15]), w Chinach (monitorowano wody Morza Południowo-Chińskiego u wybrzeża wyspy Hong Kong [18, 19]), w Malawi (cieki wodne w pobliżu miasta Blantyre, wschodnia Afryka [20]), w Turcji (monitorowano zanieczyszczenie metalami ciężkimi wód jeziora Sariyar [21] i rzeki Tygrys [22]), we Włoszech (wody Morza Tyrreńskiego w Zatoce Gaeta [23]) oraz w Wielkiej Brytanii, gdzie wykorzystano glony do monitoringu wód Morza Północnego [24].

Przykładami badań biomonitoringowych z wykorzystaniem *Elodea canadensis* są badania prowadzone m.in. w Polsce (monitorowano wody rzek zlewni Odry) [3, 4], w Czechach (w latach 1992-1994 monitorowano wody rzek zlewni Morawy) [5], w Mołdawii (dokonano oceny zanieczyszczenia rtęcią wód Dniestru) [6], w Finlandii (badano wody jezior Vesijärvi i Pääjärvi) [7] i w Nowej Zelandii (monitorowano rzeki i jeziora w Strefie Wulkanicznej Taupo) [8]. *Lemna minor* L. była natomiast próbnikiem zanieczyszczenia wód w badaniach prowadzonych m.in. w Chorwacji [25], w Brazylii [26] i w Polsce [27].

Celem badań, których wyniki zaprezentowano w tym artykule, była ocena właściwości sorpcyjnych roślin wodnych: *Spirogyra* sp., *Elodea canadensis* Michx. i *Lemna minor* L. W roślinach porastających wody Łowiska Leśnego w Pokrzywnie porównywano stężenia: Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd i Pb. Wyznaczono także współczynnik biokoncentracji BCF (*Bioconcentration factor*) [28], określając w ten sposób zdolność wybranych elementów bioty do akumulowania metali ciężkich.

### Charakterystyka badanych organizmów

Głony należą do grupy roślin plechowych. Znanych jest ponad 20 000 gatunków glonów. Ze względu na występowanie w bardzo zróżnicowanych warunkach i dużą odporność na czynniki fizykochemiczne należą do pionierów zasiedlających nowe środowiska, a ich wskaźnikowe właściwości są wykorzystywane w biomonitoringu wód. Skrętnica (*Spirogyra* sp.) jest słodkowodnym, wielokomórkowym, nitkowatym glonem należącym do gromady *Chlorophyta* (zielenice) i klasy *Conjugatae* (sprzężnice) [29, 30].

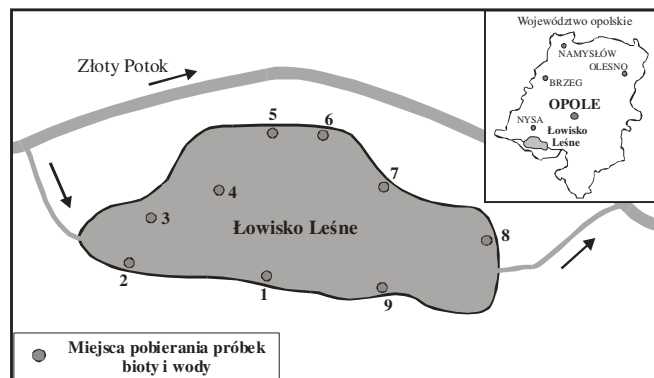
Moczarka kanadyjska (*Elodea canadensis* Michx.) to gatunek rośliny wodnej należący do gromady *Magnoliophyta* (Okrytonasienne) i klasy *Monocots* (Jednoliścienne), pochodzący z Ameryki Północnej. W Europie Środkowej jest obecnie jedną z najbardziej pospolitych roślin wodnych. Jest rośliną o bardzo szerokiej tolerancji ekologicznej, występuje we wszystkich rodzajach wód z wyjątkiem wód słonych i skrajnie ubogich w substancje organiczne [31, 32].

Rzęsa drobna (*Lemna minor* L.) jest jedną z najmniejszych na świecie roślin naczyniowych. Należy do gromady *Magnoliophyta* (Okrytonasienne) i klasy *Monocots* (Jednoliścienne). Występuje powszechnie na prawie całej kuli ziemskiej. Tak jak moczarka kanadyjska jest rośliną wieloletnią [31, 32].

### Sposoby pobierania i preparowania próbek bioty i wody

Próbki bioty: *Spirogyra* sp., *Elodea canadensis* Michx. i *Lemna minor* L. (próbki zintegrowane [33]) oraz wody pobrano z Łowiska Leśnego w Pokrzywnie (południowo-zachodnia Polska - N 50° 17' 9,756'', E 17° 28' 12, 6''), w sierpniu 2009 r. Zbiornik, z którego pobierano próbki, jest małym (ok. 1,5 ha) zbiornikiem

przepływowym, zasilanym wodami Złotego Potoku. Miejsca pobierania próbek zaznaczono na mapie (rys. 1).



Rys. 1. Miejsca pobierania próbek bioty i wody z Łowiska Leśnego w Pokrzywnie

Fig. 1. Locations of samples biota and water uptake from the Pokrzywna Forest Fishery

Próbki pobierano w odległości do 2,0 m od linii brzegowej jeziora, w strefie litoralnej, oraz w otwartej toni wodnej (strefa pelagialna). Badaniom poddano próbki pobrane z 9 miejsc. Próbki roślin przeznaczone do analiz oczyszczano z zanieczyszczeń mechanicznych, suszono w temperaturze 373 K i homogenizowano w moździerzu agatowym. Zhomogenizowane próbki o masie 0,5 g były mineralizowane w mieszaninie kwasu chlorowodorowego i kwasu azotowego(V), w mineralizatorze mikrofalowym MARS-X firmy CEM [34].

Z miejsc, z których pobierano próbki roślin, pobrano także próbki wody. Pobierano je z warstwy epilimnionu, tj. warstwy powierzchniowej wody, dobrze wymieszanej, natlenionej i stosunkowo cieplej: 291 K. Próbki po przewiezieniu do laboratorium były przenoszone na układ filtracyjny w celu odseparowania zanieczyszczeń stałych. W tak przygotowanych próbkach po zakwaszeniu kwasem azotowym(V) i 8-krotnym zateżeniu oznaczono metale ciężkie.

Do oznaczania metali ciężkich wykorzystano absorpcyjny spektrometr atomowy SOLAAR 969 firmy UNICAM, produkcji Thermo Electron Corporation, USA.

### Zapewnienie i kontrola jakości

Tabela 1. Granice wykrywalności (IDL) oraz granice oznaczalności (IQL) charakteryzujące spektrometr SOLAAR 969

Table 1. The instrumental detection limits (IDL) and instrumental quantification limits (IQL) for the spectrometer SOLAAR 969

Metal	IDL [mg/dm <sup>3</sup> ]	IQL [mg/dm <sup>3</sup> ]
Mn	0,0016	0,029
Fe	0,0043	0,06
Ni	0,008	0,063
Cu	0,0045	0,041
Zn	0,0033	0,013
Cd	0,0028	0,032
Pb	0,013	0,10

W tabeli 1 podano granice wykrywalności oraz granice oznaczalności metali ciężkich, charakteryzujące spektrometr SOLAAR 969 [35]. Do kalibrowania aparatu wykorzystano wzorce firmy ANALYTIKA Ltd. (CZ).

W tabeli 2 przedstawiono stężenia metali ciężkich oznaczone w certyfikowanych materiałach referencyjnych BCR-414 plankton i BCR-482 lichen, wytwarzanych przez *Institute for Reference Materials and Measurements, Belgium*.

Tabela 2. Porównanie zmierzonych i certyfikowanych wartości stężeń analitów w BCR-414 plankton i BCR-482 lichen

Table 2. Comparison of measured and certified concentrations in BCR-414 plankton and in BCR-482 lichen

Metal	BCR-414 plankton		AAS		Dev. *
	Stężenie	±Niepewność	Średnia	±SD	
	[mg/kg s.m.]				[%]
Mn	299	12	276	15	-7,7
Fe	1,85	0,19	1,74	0,21	-5,9
Ni	18,8	0,8	n.d.	n.d.	n.d.
Cu	29,5	1,3	27,8	1,9	-5,8
Zn	112	3	103	4	-8,0
Cd	0,383	0,014	n.d.	n.d.	n.d.
Pb	3,97	0,19	3,7	0,3	-6,8
Metal	BCR-482 lichen		AAS		Dev. *
	Stężenie	±Niepewność	Średnia	±SD	
	[mg/kg s.m.]				[%]
Mn	33,0	0,5	31,2	0,8	-5,5
Fe	804	160	n.d.	n.d.	n.d.
Ni	2,47	0,07	2,16	0,32	-13
Cu	7,03	0,19	6,54	0,18	-7,0
Zn	100,6	2,2	93,9	2,5	-6,7
Cd	0,56	0,02	0,52	0,04	-7,1
Pb	40,9	1,4	37,6	0,9	-7,6

\* Względna różnica pomiędzy stężeniem zmierzonym i certyfikowanym  $100\% \cdot (c_z - c_c) / c_c$

n.d. - nie oznaczano

## Wyniki i ich interpretacja

Średnie stężenia metali ciężkich oznaczonych w próbkach roślin wodnych: *Spirogyra* sp. ( $c_{\text{śred. glony}}$ ), *Elodea canadensis* Michx. ( $c_{\text{śred. moczarka}}$ ) i *Lemna minor* L. ( $c_{\text{śred. rzęsa}}$ ) pobranych z 9 miejsc pomiarowych przedstawiono w tabeli 3. W tabeli podano także wartości odchylenia standardowego  $\pm s$ .

Tabela 3. Średnie stężenia metali ciężkich w próbkach roślin wodnych [mg/kg s.m.]

Table 3. Mean concentrations of heavy metals in aquatic plants [mg/kg d.m.]

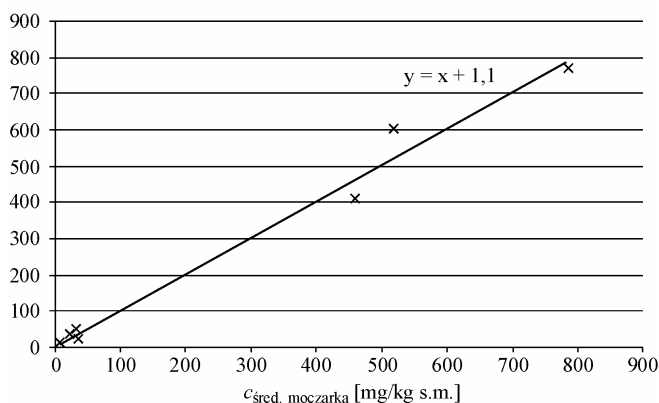
Parametr	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
<i>Spirogyra</i> sp.							
$c_{\text{śred. glony}}$	$7,7 \cdot 10^2$	$6,0 \cdot 10^2$	41	21	$4,0 \cdot 10^2$	6,1	34
$\pm s$	$4,9 \cdot 10^2$	$4,1 \cdot 10^2$	34	11	$2,3 \cdot 10^2$	3,0	21
<i>Elodea canadensis</i> Michx.							
$c_{\text{śred. moczarka}}$	$7,8 \cdot 10^2$	$5,2 \cdot 10^2$	31	37	$4,6 \cdot 10^2$	7,0	25
$\pm s$	$5,8 \cdot 10^2$	$3,4 \cdot 10^2$	17	20	$2,4 \cdot 10^2$	3,0	11
<i>Lemna minor</i> L.							
$c_{\text{śred. rzęsa}}$	$5,4 \cdot 10^3$	$3,4 \cdot 10^3$	67	18,2	$4,5 \cdot 10^3$	7,5	32
$\pm s$	$3,2 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	62	8,0	$2,2 \cdot 10^3$	5,0	14

Wartości  $\pm s$  wskazują na duże zróżnicowanie stężeń badanych analitów w próbkach pobranych z różnych miejsc jeziora. Różnice te mogą wynikać z niejednorodnego składu

wody. Łowisko Leśne jest zbiornikiem przepływowym, a wymiana wody następuje głównie wzdłuż środkowej części jeziora. Nie bez znaczenia są też miejsca nagromadzenia osadów dennych.

Na wykresach (rys. rys. 2 i 3) porównano średnie stężenia analitów zakumulowanych w badanych próbkach.

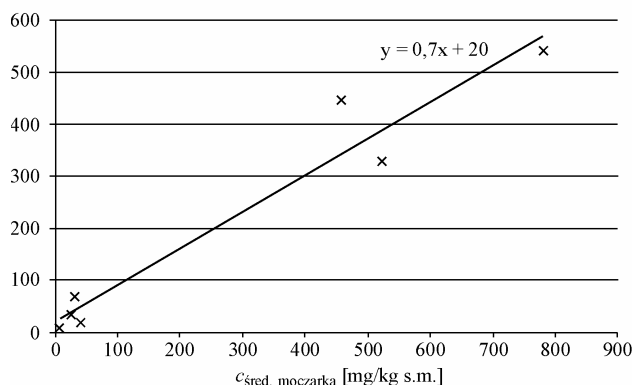
$c_{\text{śred. glony}}$  [mg/kg s.m.]



Rys. 2. Porównanie średnich stężeń metali ciężkich zakumulowanych w moczarce kanadyjskiej (*Elodea canadensis* Michx.) i glonach *Spirogyra* sp.

Fig. 2. Comparison of heavy metals mean concentrations accumulated in *Elodea canadensis* Michx. and *Spirogyra* sp.

$c_{\text{śred. rzęsa}}$  [mg/kg s.m.]



Rys. 3. Porównanie średnich stężeń metali ciężkich zakumulowanych w moczarce kanadyjskiej (*Elodea canadensis* Michx.) i rzęsie (*Lemna minor* L.)

Fig. 3. Comparison of heavy metals mean concentrations accumulated in *Elodea canadensis* Michx. and *Lemna minor* L.

Wyniki przedstawione na wykresach wskazują, że pod względem zdolności do bioakumulacji metali ciężkich badane rośliny wodne można uszeregować: *Spirogyra* sp.  $\approx$  *Elodea canadensis* Michx. > *Lemna minor* L.

W tabeli 4 zestawiono średnie stężenia metali ciężkich oznaczone metodą AAS w próbkach wody pobranych z miejsc, w których pobierano próbki roślin.

Tabela 4. Średnie stężenie metali ciężkich w próbkach wody [mg/dm<sup>3</sup>]

Table 4. Mean concentrations of heavy metals [mg/dm<sup>3</sup>] in water samples

Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
0,061	0,066	0,016	< 0,005	0,032	< 0,004	< 0,025

Porównanie uzyskanych wyników z wartościami granicznymi chemicznych wskaźników jakości według kategorii jednolitych części wód powierzchniowych [1] wskazuje, że stężenia niklu, miedzi i cynku nie przekraczają wartości granicznych. Zgodnie z rozporządzeniem ministra środowiska, wartości graniczne dla kadmu i ołowiu (oraz ich związków) wynoszą odpowiednio  $0,00045 \pm 0,0015 \text{ mg/dm}^3$  (w zależności od twardości wody) i  $0,0072 \text{ mg/dm}^3$ . Wartości te są znacznie mniejsze niż granice oznaczalności zastosowanej metody analitycznej, które wynoszą odpowiednio  $0,004$  i  $0,025 \text{ mg/dm}^3$ . Rozporządzenie to nie klasyfikuje wód powierzchniowych pod względem zawartości żelaza i manganu.

W celu oceny właściwości bioakumulacyjnych badanych roślin wodnych wyznaczono współczynnik biokoncentracji (Bioconcentration Factor - BCF) [28]:

$$BCF = c_{x,r}/c_{x,w}$$

gdzie: x - Mn, Ni, Cu, Cd i Pb,  $c_{x,r}$  [mg/kg s.m.] - stężenie metalu w roślinie,  $c_{x,w}$  [mg/dm<sup>3</sup>] - stężenie metalu w wodzie.

Wartości współczynnika BCF > 1000 wskazują na bardzo dobre właściwości akumulacyjne metali ciężkich w danych elementach bioty (np. w roślinach wodnych: *Hydrocotyle umbellata* [36] i *Eichhornia crassipes* [37], zooplanktonie [28, 38] oraz w glonach [39]), a także na możliwość ich zastosowania w biomonitoringu oraz w efektywnej fitoremediacji [36].

W tabeli 5 zestawiono obliczone wartości współczynnika BCF, wskazujące na właściwości akumulacyjne badanych roślin. Współczynniki BCF wyznaczono dla średnich stężeń metali ciężkich zakumulowanych w roślinach oraz w wodzie.

Tabela 5. Wartości BCF obliczone dla średnich stężeń analitów zakumulowanych w roślinach i w wodzie

Table 5. The BCF values calculated from the mean concentrations of analytes accumulated in plants and in water

Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb	BCF <sub>sr.</sub>
<i>Spirogyra</i> sp.							
12590	9090	2568	> 4200	12531	> 1527	> 1372	> 6268
<i>Elodea canadensis</i> Michx.							
12803	7833	1937	> 7340	14343	> 1750	> 1008	> 6716
<i>Lemna minor</i> L.							
8885	5106	4187	> 3640	13906	> 1875	> 1296	> 5556

Wyznaczone średnie wartości współczynników biokoncentracji:  $BCF_{sr.} = (\sum BCF_x) / 7$ , gdzie x: Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Cd i Pb, wskazują na bardzo dobre właściwości sorpcyjne badanych roślin. Na uwagę zasługują duże wartości BCF wyznaczone dla glonów *Spirogyra* sp., występujących w badanym zbiorniku tylko okresowo, co z kolei wskazuje, że glony mogą być dobrym próbnikiem do bieżącej oceny zanieczyszczenia wód metalami ciężkimi.

Na różną biodostępność w stosunku do oznaczanych metali ciężkich może mieć wpływ forma występowania analitu, stężenie i okres narażenia rośliny na jego działanie, komórkowa dystrybucja metalu, formy magazynowania i detoksykacji metalu, interakcje z innymi związkami obecnymi w komórce oraz cechy gatunkowe (np. zdolności adaptacyjne) [40].

## Podsumowanie i wnioski

Biomonitoring staje się coraz bardziej popularną metodą, służącą do oceny zanieczyszczenia różnych ekosystemów, w tym wodnych. Podstawową zaletą biomonitoringu jest tani i niewymagający specjalnego wykształcenia sposób pobierania próbek oraz to, że biomonitory akumulują biodostępne formy zanieczyszczeń.

Celem prowadzonych badań była ocena właściwości sorpcyjnych wybranych roślin wodnych: glonów *Spirogyra* sp., moczarki kanadyjskiej (*Elodea canadensis* Michx.) i rzęsy drobnej (*Lemna minor* L.). Wyniki przedstawione na wykresach (rys. 2 i 3) wskazują na liniowe współzależności średnich wartości stężeń badanych analitów zakumulowanych w roślinach, przy czym wyznaczone odchylenia standardowe dla serii stężeń metali w próbkach pobranych z 9 miejsc w większości oznaczeń przekraczają 50% wartości średniej (tab. 3). Może to świadczyć o niejednorodnym składzie chemicznym wody w jeziorze, ale też o dużej niepewności metody analitycznej. Pod względem zdolności do akumulacji metali ciężkich badane rośliny można uszeregować: *Spirogyra* sp.  $\approx$  *Elodea canadensis* Michx. > *Lemna minor* L.

Jedną z wymaganych cech biomonitorów jest tolerancja na zanieczyszczenia. Z przeprowadzonych badań wynika, że badane rośliny wodne charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami sorpcyjnymi w odniesieniu do metali ciężkich. Wyznaczone współczynniki biokoncentracji (tab. 5) wskazują, że stężenia metali w 1 g s.m. badanych roślin kilkukrotnie przekraczają stężenia metali w 1 dm<sup>3</sup> wody. Właściwości te mogą zostać wykorzystane także w procesach fitoremediacji.

## Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 sierpnia 2008 r. w sprawie sposobu klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych (DzU z 2008 r., Nr 162, poz. 1008).
- [2] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 maja 2009 r. w sprawie form i sposobu prowadzenia monitoringu jednolitych części wód powierzchniowych (DzU z 2009 r., Nr 81, poz. 685).
- [3] Rajfur M., Kłos A. i Waclawek M.: *Application of alga in biomonitoring of the Large Turawa Lake*. Environ. Monit. Assess. 2010, wysłane do druku.
- [4] Samecka-Cymerman A. i Kempers J.: *Heavy metals in aquatic macrophytes from two small rivers polluted by urban, agricultural and textile industry sewages SW Poland*. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 2007, **53**, 198-206.
- [5] Žáková Z. i Kočková E.: *Biomonitoring and assessment of heavy metal contamination of streams and reservoirs in the Dyje/Thaya River basin, Czech Republic*. Water Sci. Technol., 1999, **39**(12), 225-232.
- [6] Munteanu V. i Munteanu G.: *Biomonitoring of mercury pollution: A case study from the Dniester River*. Ecol. Indic., 2007, **7**, 489-496.
- [7] Kähkönen M.A., Pantsar-Kallio M. i Manninen P.K.G.: *Analysing heavy metal concentrations in the different parts of Elodea canadensis and surface sediment with PCA in two boreal lakes in southern Finland*. Chemosphere, 1997, **35**(11), 2645-2656.
- [8] Robinson B., Kim N., Marchetti M., Moni Ch., Schroeter L., van den Dijssel C., Milne G. i Clothier B.: *Arsenic hyperaccumulation by aquatic macrophytes in the Taupo Volcanic Zone, New Zealand*. Environ. Exp. Bot., 2006, **58**, 206-215.
- [9] Al-Shwafi N.A. i Rushdi A.I.: *Heavy metal concentrations in marine green, brown, and red seaweeds from coastal waters of Yemen, the Gulf of Aden*. Environ. Geol., 2008, **55**, 653-660.



- [10] Topcuoğlu S., Güven K.C., Balkis N. i Kirbaşoğlu C.: *Heavy metal monitoring of marine algae from the Turkish Coast of the Black Sea, 1998-2000*. Chemosphere, 2003, **52**, 1683-1688.
- [11] Haritonidis S. i Malea P.: *Bioaccumulation of metals by the green alga *Ulva rigida* from Thermaikos Gulf, Greece*. Environ. Pollut., 1999, **104**, 365-372.
- [12] Malea P. i Haritonidis S.: *Use of the green alga *Ulva rigida* C. Agardh as an indicator species to reassess metal pollution in the Thermaikos Gulf, Greece, after 13 years*. J. Appl. Phycol., 2000, **12**, 169-176.
- [13] Dosnon-Olette R., Couderchet M. i Eullaffroy P.: *Phytoremediation of fungicides by aquatic macrophytes: Toxicity and removal rate*. Ecotoxicol. Environ. Saf., 2009, **72**, 2096-2101.
- [14] El-Sikaily A., El Nemr A., Khaled A. i Abdelwehab O.: *Removal of toxic chromium from wastewater using green alga *Ulva lactuca* and its activated carbon*. J. Hazard. Mater., 2007, **148**, 216-228.
- [15] Karez C.S., Magalhaes V.F., Pfeiffer W.C. i Amado Filho G.M.: *Trace metal accumulation by algae in Sepetiba Bay, Brazil*. Environ. Pollut., 1994, **83**(3), 351-356.
- [16] Karez C.S., Amado Filho G.M., Moll D.M. i Pfeiffer W.C.: *Metal concentrations in benthic marine algae in 3 regions of the state of Rio de Janeiro*. Anais Acad. Brasil. Cien., 1994, **66**(2), 205-211.
- [17] Amado Filho G.M., Andrade L.R., Karez C.S., Farina M. i Pfeiffer W.C.: *Brown algae species as biomonitors of Zn and Cd Sepetiba Bay, Rio de Janeiro, Brazil*. Mar. Environ. Res., 1999, **48**, 213-224.
- [18] Ho Y.B.: **Ulva lactuca* as bioindicator of metal contamination in intertidal waters in Hong Kong*. Hydrobiologia, 1990, **230**(1-2), 73-81.
- [19] Ho Y.B.: *Metals in *Ulva lactuca* in Hong Kong intertidal waters*. Bull. Mar. Sci., 1990, **47**(1), 79-85.
- [20] Kaonga C.C., Chiotha S.S., Monjerezi M., Fabiano E. i Henry E.M.: *Levels of cadmium, manganese and lead in water and algae; *Spirogyra aequinoctialis**. Int. J. Environ. Sci. Tech., 2008, **5**(4), 471-478.
- [21] Atici T., Ahiska S., Altindag A. i Aydin D.: *Ecological effects of some heavy metals (Cd, Pb, Hg, Cr) pollution of phytoplanktonic algae and zooplanktonic organisms in Sariyar Dam Reservoir in Turkey*. Afr. J. Biotechnol., 2008, **7**(12), 1972-1977.
- [22] Karadede-Akin H. i Ünlü E.: *Heavy metal concentrations in water, sediment, fish and some benthic organisms from Tigris River, Turkey*. Environ. Monit. Assess., 2007, **131**, 323-337.
- [23] Conti M.E. i Cecchetti G.: *A biomonitoring study: trace metals in algae and molluscs from Tyrrhenian coastal areas*. Environ. Res., 2003, **93**, 99-112.
- [24] Giusti L.: *Heavy metal contamination of brown seaweed and sediments from the UK coastline between the Wear river and the Tees river*. Environ. Int., 2001, **26**, 275-286.
- [25] Radić Brkanac S., Stipaničev D., Širac S., Glavaš K. i Pevalek-Kozlina B.: *Biomonitoring of surface waters using duckweed (*Lemma Minor* L.)*, BALWOIS 2010 - Ohrid, Republic of Macedonia - 25, 29 May 2010.
- [26] Watanabe T., Coler R.A. i Paz R.J.: *The implementation of a regional biomonitoring program in northeast Brazil*. Aqua. Ecosys. Health Manage., 1999, **2**, 187-189.
- [27] Kaza M., Mankiewicz-Boczek J., Izydorczyk K. i Rawicki J.: *Toxicity assessment of water samples from rivers in central Poland using a battery of microbioassays - a pilot study*. Polish J. Environ. Stud., 2007, **16**(1), 81-89.
- [28] Nguyen L.H., Leermakers M., Elskens M., Ridder D.F., Doan H.T. i Baeyens W.: *Correlations, partitioning and bioaccumulation of heavy metals between different compartments of Lake Balaton*. Sci. Total. Environ., 2005, **341**, 211-226.
- [29] Kawecka B. i Eloranta V.P.: *Zarys ekologii glonów wód słodkich i środowisk lądowych*. WN PWN, Warszawa 1994.
- [30] Podbielkowski Z.: *Glony*. Wyd. Szkol. i Pedagog., Warszawa 1996.
- [31] Kłosowski S. i Kłosowski G.: *Rośliny wodne i bagienne*. O.W. Multico, Warszawa 2007.
- [32] Matuszkiewicz W.: *Przewodnik do oznaczania zbiorowisk roślinnych Polski*. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2006.
- [33] Namieśnik J. i Jamrógiewicz Z.: *Fizykochemiczne metody kontroli zanieczyszczeń środowiska*. WNT, Warszawa 1998.
- [34] Matuszkiewicz H.: *Metody rozkładu próbek na mokro w analizie śladowej*. Chem. Inż. Ekol., 2004, **11**(S4), 463-498.
- [35] Instrukcja obsługi aparatu AAS SOLAR 969 firmy UNICAM. Spectro-Lab, Warszawa 1997.
- [36] Panyakhan S., Kruatrachue M., Pokethitiyook P., Soonthornsarathoon V. i Upatham S.: *Toxicity and accumulation of cadmium and zinc in *Hydrocotyle umbellata**. Sci. Asia, 2006, **32**, 323-328.
- [37] Zhu Y.L., Zayed A.M., Qian J.H., De Souza M. i Terry N.: *Phytoaccumulation of trace elements by wetland plants: II. Water hyacinth*. J. Environ. Qual., 1999, **28**(1), 339-344.
- [38] Rubio-Franchini I., Saavedra M.J. i Rico-Martinez R.: *Determination of lead in samples of zooplankton, water, and sediments in a Mexican reservoir: evidence for lead biomagnification in lower/intermediate trophic levels?* Environ. Toxicol., 2008, **23**(4), 459-465.
- [39] Jara-Marini M.E., Soto-Jiménez M.F. i Páez-Osuna F.: *Trace metals accumulation patterns in a mangrove lagoon ecosystem, Mazatlan Harbor, southeast Gulf of California*. J. Environ. Sci. Health Part. A., 2008, **43**(9), 995-1005.
- [40] Kabziński A.K.M.: *Metale ciężkie. Cz. II. Emisja i wpływ metali na środowisko*. Bioskop, 2007, **3**, 5-10.