

Katarzyna SOBCZYŃSKA-WÓJCIK¹ i Małgorzata RAFAŁOWSKA¹

STĘŻENIA FOSFORU W WODZIE ZRENATURYZOWANYCH ZBIORNIKÓW NALEŻĄCYCH DO SYSTEMU RZECZNO-JEZIORNEGO

THE CONCENTRATIONS AND ACCUMULATION OF PHOSPHORUS IN WATER OF RESTORED BODIES IN A RIVER-LAKE SYSTEM

Abstrakt: W przypadku wód dopływających do jezior zaobserwowano poprawę w zakresie obniżenia stężeń fosforu ogólnego po ich przepłynięciu przez akweny, a utrzymywanie się wysokich koncentracji P_{og} w wodach badanych jezior należy wiązać także z ich polimiktycznym charakterem. Z dostawy zanieczyszczeń (P_{og}) do zbiorników układu paciorkowego wynika, iż wody dopływów wnoszą do jezior znaczne jego ilości, powodując ponadnormatywne stężenia P_{og} w wodzie akwenów i przyspieszając w ten sposób procesy, które pogarszają jej jakość oraz funkcjonowanie jezior. Średnie z trzech lat stężenia fosforu - pierwiastka limitującego produkcję pierwotną - mieściły się więc w zbiornikach systemu rzeczno-jeziornego w zakresie od 0,22 do 0,34 mg P·dm⁻³. Sporządzone obliczenia akumulacji P_{og} w wodzie badanych zbiorników oraz analiza statystyczna wyników wykazały, że większy wpływ na nagromadzenie biogenu miała objętość wody niż stężenie substancji, wskazując zatem na duże możliwości rozcieńczenia substancji przedostających się ze zlewni.

Słowa kluczowe: system rzeczno-jeziorny, jeziora polimiktyczne, akumulacja fosforu

Środowisko przyrodnicze obszarów młodogłacjalnych charakteryzuje się występowaniem w nim specyficznych układów obiektów hydrograficznych, zwanych rzeczno-jeziornymi. Odcinki rzeczne łączące jeziora są krótkie i mają najczęściej charakter przelewów. Funkcjonujący w ten sposób ekosystem wodny ma dużą zdolność do przechwytywania i przetrzymywania okresowo materii, która migruje ze zlewni, sam jednocześnie produkując duże ilości materii organicznej. Dopływająca rzeka wnosi do niego biogeny, przyczyniając się do ich ponadnormatywnych stężeń w wodzie, przyspieszając procesy, które pogarszają jakość wody i funkcjonowanie jezior. Obieg pierwiastków biofilnych decyduje zatem o trofii wód [1, 2]. W ramach jednego systemu rzeczno-jeziornego jezioro może być zarówno pułapką dla fosforu, jak też jego eksporterem [3].

Fosfor, obok azotu i potasu, należy do „trio chemicznego”, czyli pierwiastków, w stosunku do których wymagania pokarmowe roślin są szczególnie duże [4]. Fosfor, nagromadzony jednak w nadmiernej ilości w środowisku wodnym, jest głównym czynnikiem powodującym zwiększenie jego żyzności, czyli eutrofizację.

Badania, które zostały przeprowadzone w zlewniach użytkowanych rolniczo, ukazują problem wpływu antropopresji na stan troficzny odtworzonych zbiorników wodnych.

Celem pracy była charakterystyka zmian stężeń fosforu w odtworzonym około 30 lat temu ekosystemie rzeczno-jeziornym oraz ocena stopnia akumulacji tego biogenu w badanych zbiornikach.

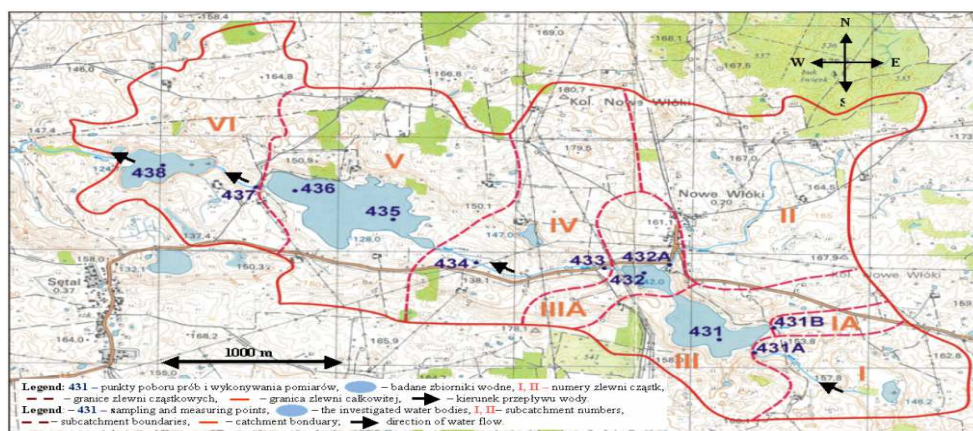
¹ Katedra Melioracji i Kształtowania Środowiska, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, pl. Łódzki 2, 10-727 Olsztyn, tel. 89 523 39 92, email: ksw@uwm.edu.pl

*Praca była prezentowana podczas konferencji ECOpole'12, Zakopane, 10-13.10.2012

Material i metody

Badaniami objęto trzy zbiorniki wodne: jezioro Nowe Włóki (składające się z dwóch plos - basenu głównego i zatoki północnej), jezioro Sętalskie Duże i jezioro Sętalskie Małe, połączone strugą Sętał w jeden system rzeczno-jeziorny, położone około 25 km na północ od Olsztyna w gminie Dywity (Pojezierze Olsztyńskie). Omawiane akweny zostały osuszone w XIX wieku w wyniku przeprowadzonych kompleksowych prac melioracyjnych, a na ich miejscu utworzono użytki zielone. Jeziora te odtworzono na przełomie lat 70. i 80. XX wieku na skutek podpiętrzenia wody na strudze. Wszystkie obiekty położone są na „Obszarze Chronionego Krajobrazu Doliny Środkowej Łyny”.

Badana zlewnia ma powierzchnię całkowitą 883,82 ha i została podzielona początkowo na 8 zlewni cząstkowych o numeracji: I, IA, II, III, IIIA, IV, V, VI. Rozmieszczenie poszczególnych zlewni wraz z punktami pomiarowymi przedstawiono na rysunku 1.



Lokalizacja i opis punktów pomiarowych: 431A - ciek prowadzący wodę do basenu głównego jeziora Nowe Włóki (Struga Sętał), 431B - dren prowadzący wodę do jeziora Nowe Włóki, 432A - rów melioracyjny prowadzący wodę do jeziora Nowe Włóki, 431 - basen główny jeziora Nowe Włóki, 432 - zatoka północna jeziora Nowe Włóki, 433 - odpływ z jeziora Nowe Włóki, 434 - dopływ do jeziora Sętalskiego Dużego, 437 - odpływ z jeziora i dopływ do jeziora Sętalskiego Małego

Location and description of measuring points: 431A - inflow to the main basin of Lake Nowe Włóki (Sętał Stream), 431B - drainage canal leading to Lake Nowe Włóki, 432A - drainage ditch leading to Lake Nowe Włóki, 431 - main basin of Lake Nowe Włóki, 432 - northern bay of Lake Nowe Włóki, 433 - outflow from Lake Nowe Włóki, 434 - inflow to Lake Sętalskie Duże, 435 - eastern part of Lake Sętalskie Duże, 436 - western part of Sętalskie Duże, 437 - outflow from Lake Sętalskie Duże and inflow to Lake Sętalskie Małe, 438 - Lake Sętalskie Małe

Rys. 1. Lokalizacja obiektów badawczych wraz z rozmieszczeniem punktów pomiarowych (skala 1:25 000)

Fig. 1. Location of the studied water bodies and measuring points (scale 1:25 000)

Próbki wody do badań laboratoryjnych pobierano raz w miesiącu przez okres trzech lat (2005-2007). Badania obejmowały oznaczenie fosforu ogólnego i fosforu fosforanowego. Analizy laboratoryjne wykonywano według powszechnie stosowanej metodyki Hermanowicza i in. [5]. Opracowania statystyczne wykonano w programie Statistica 7 oraz EXCEL.

Wyniki i dyskusja

Badane zbiorniki wodne, funkcjonujące w układzie kaskadowym, różniły się znacznie pod względem stężeń fosforu ogółem w kolejnych latach hydrologicznych. Średnie koncentracje z całego okresu badań były jednak zbliżone (z wyjątkiem zatoki północnej 431 jeziora Nowe Włóki) i wyniosły one od 0,22 do 0,34 mg P_{og}·dm⁻³, przy bardzo

wysokich wahań stężeń w ciągu trzech lat (od 0,03 do 2,27 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$). Wartość mediany stężeń w analizowanych zbiornikach zawierała się w przedziale od 0,16 do 0,25 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$ (tab. 1).

Tabela 1
Zmiany stężeń P_{og} w wodach obiektów badawczych w poszczególnych latach hydrologicznych 2005-2007 [mg $\cdot dm^{-3}$]. Analizę wariancji dla układów dwuczynnikowych (TWO - WAY ANOVA $P \leq 0,001$) wykonano testem Duncana

Table 1
Annual variations in total P concentrations in the studied water bodies in hydrological years 2005-2007 [mg $\cdot dm^{-3}$]. A two-way analysis of variance (Two-Way Anova $p \leq 0.001$) was performed using Duncan's test

Nazwa obiektu		Punkt pomiarowy	P_{og}			2005-2007				
			2005	2006	2007	średnia	wahania	$\pm SD$	CV	mediana
Zbiorniki przepływowe										
Jezioro Nowe Włóki	ciek polny (struga)	431A*	0,18 ^a	0,12 ^a	0,21 ^a	0,17 ^a	0,06-0,52	0,14	80	0,16
	dren	431B	-	0,11 ^a	0,28 ^a	0,29 ^{ab}	0,04-0,84	0,23	115	0,19
	rów mel.	432A	0,23 ^a	0,31 ^a	0,33 ^a	0,29 ^{ab}	0,05-0,75	0,20	70	0,21
	basen	431	0,20 ^a	0,24 ^a	0,31 ^a	0,25 ^{ab}	0,04-0,78	0,21	84	0,20
	zatoeka	432	0,24 ^a	0,41 ^b	0,35 ^a	0,34 ^b	0,04-2,27	0,38	112	0,25
	odpływ	433	0,31 ^a	0,25 ^a	0,27 ^a	0,28 ^{ab}	0,05-0,86	0,18	67	0,23
Jezioro Sętalskie Duże	dopływ	434	0,25 ^a	0,19 ^a	0,34 ^a	0,26 ^{ab}	0,04-1,08	0,20	77	0,20
	cz. wsch.	435	0,19 ^a	0,23 ^a	0,24 ^a	0,22 ^{ab}	0,03-0,48	0,13	60	0,18
	cz. zach.	436	0,17 ^a	0,23 ^a	0,31 ^a	0,24 ^{ab}	0,06-0,97	0,17	71	0,21
	odpływ	437	0,16 ^a	0,22 ^a	0,34 ^a	0,22 ^{ab}	0,03-0,62	0,13	59	0,20
Jezioro Sętalskie Małe		438	0,16 ^a	0,23 ^a	0,27 ^a	0,22 ^{ab}	0,06-0,56	0,14	62	0,16

*Objaśnienia jak na rysunku 1

*Explanations the same as Figure 1

a, b, c, ... - różne symbole literowe oznaczają grupy średnich w wodach badanych obiektów różniących się istotnie statystycznie w teście Duncana (Post-hoc) $P \leq 0,001$

a, b, c... - superscript letters represent groups of means that differ statistically in Duncan's test (Post-hoc) $p \leq 0.001$ in flow-through water bodies

W wodach zasilających jezioro Nowe Włóki statystycznie istotnie niższe średnie stężenie fosforu ogółem z trzech lat wystąpiło w dopływie ciekupolnego 431A (Strugi) - 0,17 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$. W przypadku wód odprowadzanych z pól zbieraczem drenarskim (431B) oraz wód odpływających rowem melioracyjnym (432A) ze zlewni użytkowanej rolniczo wraz z zabudową wiejską średnie koncentracje P_{og} z okresu badań były wyższe o ponad 60% i wyniosły 0,29 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$. Najwyższa wartość mediany została obliczona dla rowu melioracyjnego 432A - 0,21 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$ (tab. 1). Na tle zbiorników funkcjonujących w systemie rzeczno-jeziornym wyraźne różnice w stężeniach P_{og} wystąpiły pomiędzy pływem głównym (południowym) i północnym jeziora Nowe Włóki. Średnie stężenie z okresu badań w basenie głównym (431) wyniosło 0,25 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$ i było niższe o ponad 30% (choć statystycznie nieistotnie) niż w zatoce północnej (432).

W zatoce, gdzie woda charakteryzowała się najwyższym współczynnikiem zmienności w okresie badań - 112% przy wahaniami 0,04-2,27 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$, średnie stężenie wyniosło 0,34 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$. Ekstremalna wartość stężenia P_{og} (2,27 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$), podobnie jak i $N-NH_4$, została odnotowana w marcu 2006 roku - podczas zalegania pokrywy lodowej. Powstały wówczas warunki sprzyjające uwalnianiu fosforu z osadów do wody. Generalnie wysokie średnie koncentracje P_{og} w okresie badań w zatoce północnej jeziora Nowe Włóki mogą wskazywać na allochtoniczne źródła fosforu, spośród których najważniejsze stanowią spływy powierzchniowe z terenów zabudowanych [6]. Dostarczanie związków biogenicnych do zbiornika jest przyczyną powstawania toksycznych, a nawet rakotwórczych zakwitów sinicowych [7], które obserwowano także w zatoce badanego jeziora. Na odpływie z jeziora (punkt 433) i dopływie (434) do jeziora Sętalskiego Dużego średnie stężenia fosforu ogólnego były niższe niż w zatoce i wyniosły odpowiednio: 0,28 i 0,26 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$. W wodzie wschodniej części (435) zbiornika Sętalskiego Dużego średnie stężenia P_{og} z okresu badań było nieco niższe (o około 8%) niż w jego części zachodniej (punkt 436). W dużej mierze miał tu wpływ rok 2007, w którym wystąpiły intensywne opady deszczu. Potwierdzają to także wysokie wówczas stężenia fosforu w styczniu (0,965 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$), czerwcu (0,395 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$) oraz lipcu (0,415 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$), przy jednocześnie obfitych opadach deszczu, wynoszących odpowiednio: 122, 116 i 122 mm. Intensywne opady deszczu mogą skutkować tym, że w bardzo krótkim czasie następuje spływ znacznej części rocznego ładunku nutrietów [8]. W tej części zbiornika zlewnia charakteryzuje się większymi spadkami terenu, co prawdopodobnie powodowało intensywniejszy dopływ gruntowy fosforu ze zlewni bezpośredniej, w której znajdują się domki letniskowe. We wschodniej części (435) zbiornika wzdłuż linii brzegowej oprócz porastającej ją roślinności wodnej występują liczne zakrzaczenia i zadrzewienia mogące ograniczać spływ ze zlewni. Na odpływie (437) z akwenu Sętalskiego Dużego średnia z trzech lat koncentracja fosforu utrzymywała się na takim samym poziomie jak w zbiorniku. Jezioro Sętalskie Małe charakteryzowało się identycznym średnim stężeniem z okresu badań P_{og} (0,22 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$) jak wschodnia część jeziora Sętalskiego Dużego. Jednak mediana stężenia P_{og} (0,16 mg $P_{og} \cdot dm^{-3}$) stanowiła wartość najniższą wśród badanych akwenów (tab. 1).

W przypadku wód dopływających do jezior zaobserwowano poprawę w zakresie obniżenia stężeń fosforu ogólnego po ich przepłynięciu przez akweny, a utrzymywanie się wysokich koncentracji P_{og} w wodach badanych jezior należy wiązać także z ich polimiktycznym charakterem. Jeziora płytkie, do których należą badane akweny (o dużym udziale dna czynnego), cechuje częste kontaktowanie się powierzchniowych mas wody z osadami dennymi, co sprzyja uwalnianiu zgromadzonego na dnie fosforu [2, 9].

Odnosząc się do występującej w akwenach zmienności stężeń fosforu, głównego pierwiastka limitującego produkcję pierwotną, sporządzono obliczenia akumulacji tego biogenu w wodzie badanych zbiorników. Zawartość fosforu przy średnim stanie wód w badanej grupie zbiorników przedstawiono w tabeli 2.

Wśród badanych akwenów przepływowych największe ilości wszystkich rozpatrywanych składników akumulowało jezioro Sętalskie Duże o największej powierzchni lustra wody. Generalnie akumulacja P_{og} wzrastała wraz z objętością wody w akwenu. Tylko zatoka północna jeziora Nowe Włóki gromadziła nieznacznie większe ilości fosforu niż jezioro Sętalskie Małe (które posiada większą objętość). Wynikało to

głównie z wyższych stężeń tego pierwiastka o ponad 35% w zatoce północnej. Akumulacja fosforu w przeliczeniu na jednostkę powierzchni zbiornika przybierała następujący układ rosnący: jezioro Sętalskie Małe < basen główny jeziora Nowe Włóki < zatoka północna jeziora Nowe Włóki < jezioro Sętalskie Duże. Obciążenie tym biogenem badanych jezior (w $[g \cdot m^{-2}]$), z wyjątkiem zatoki północnej, rosło wraz ze wzrostem powierzchni akwenu. W przypadku zatoki północnej duży wpływ miała jedna ze zlewni cząstkowych (nr II), z której następował duży dopływ zanieczyszczeń rowem melioracyjnym. Wysokie stężenia badanego składnika w wodzie zatoki wskazują również na duże znaczenie procesów zachodzących w obrębie samego zbiornika - uwalnianie z osadów (tab. 2).

Tabela 2

Akumulacja fosforu w wodzie zbiorników systemu rzeczno-jeziornego
(przy średnich stanach wód w okresie badań) [kg]

Table 2

Accumulation of phosphorus in water of the river-lake system
(at average level of water during the study period) [kg]

Składnik	Akumulacja $[kg \cdot zbiornik^{-1}]$				Łączna akumulacja w zbiornikach [kg]
	Nowe Włóki Basen gł. (431)	Nowe Włóki Zatoka półn. (432)	Sętalskie Duże (435,436)	Sętalskie Małe (438)	
P_{og}	57,98	23,12	233,81	22,67	337,57
Akumulacja $[g \cdot m^2 \text{ powierzchni zbiornika}]$					Akumulacja $[g \cdot m^2]$ łącznej pow. zbiorników
P_{og}	0,4	0,5	0,5	0,2	0,5
Akumulacja $[kg \cdot ha^{-1} \text{ zlewni}]^*$					Akumulacja $[kg \cdot ha^{-1}]$ zlewni całkowitej
P_{og}	0,35	0,06	0,33	0,03	0,42

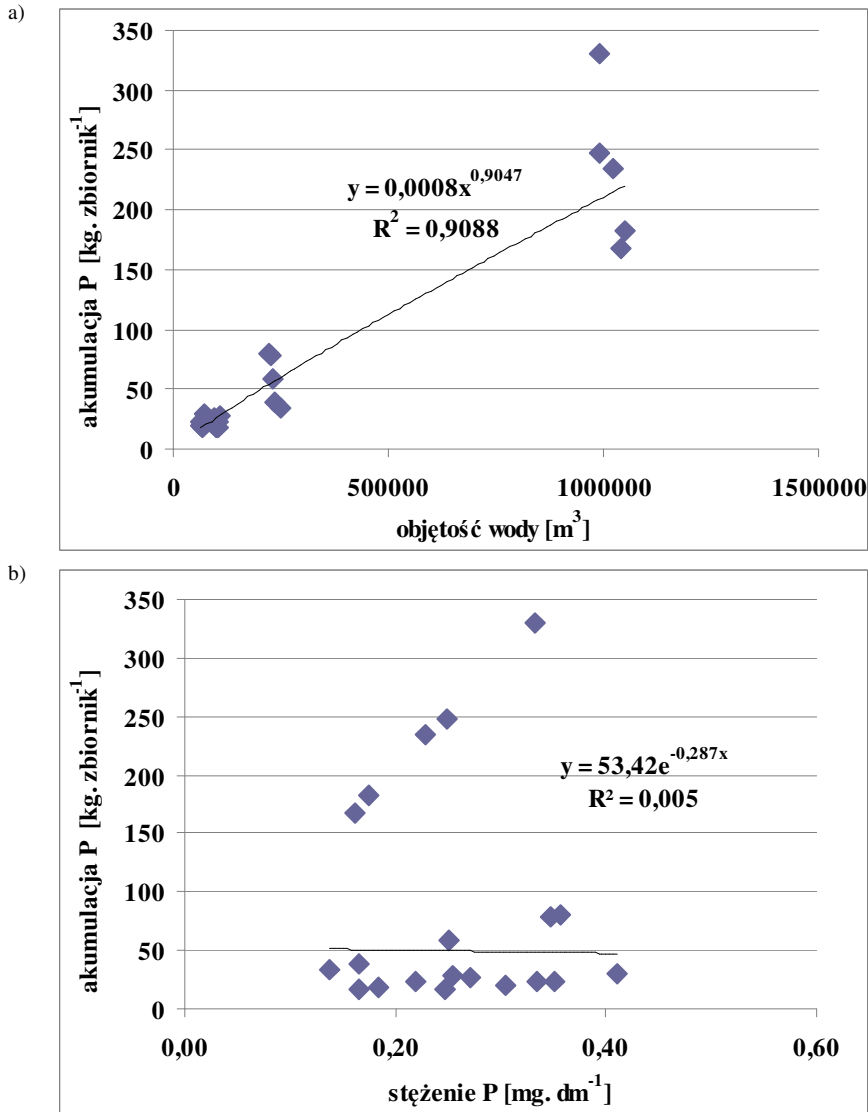
* wielkość zlewni narastająco dla każdego zbiornika

* size of catchment - increasing for everyone bodies

W paciorkowym układzie zbiorników najwięcej P_{og} z 1 ha zlewni akumulowały basen główny jeziora Nowe Włóki oraz jezioro Sętalskie Duże. Wynikało to z cech morfometrycznych zbiorników (większej pojemności) oraz z kolejności położenia w omawianym systemie. Jeziora gromadziły łącznie z 1 hektara zlewni całkowitej 0,42 kg P_{og} (tab. 2). Są to ilości fosforu mieszczące się w przedziale podawanym przez innych autorów dla terenów użytkowanych rolniczo [9].

Przeprowadzono również analizę statystyczną, ustalając zależności regresyjne pomiędzy akumulacją fosforu ogólnego a objętością wody i stężeniami substancji w zbiornikach. Relacje pomiędzy powyższymi cechami najlepiej wyrażały funkcje potęgowe (rys. 2a,b). Dowiedziono, że w jeziorach występujących w układzie paciorkowym współczynnik determinacji R^2 był najwyższy dla zależności „akumulacja substancji a objętość wody w akwie” i wyniósł on 0,908 (rys. 2a). Bliski jedności współczynnik determinacji jednoznacznie wskazuje, że na akumulację fosforu ogólnego w wodzie zbiorników miała większy wpływ jej objętość niż stężenie substancji. W odtworzonych zbiornikach przepływowych wystąpiły natomiast bardzo słabe zależności regresyjne pomiędzy akumulacją a stężeniem substancji R^2 - 0,005 (rys. 2b). Silne

powiązanie „akumulacja - objętość wody” wskazuje zatem na duże możliwości rozcieńczania substancji przedostających się ze zlewni.



Rys. 2. Krzywe i równania regresji oraz współczynnik determinacji R^2 przedstawiające (a) zależność akumulacji fosforu [kg·zbiornik⁻¹] względem objętości wody w zbiornikach systemu rzeczno-jeziernego [m³] i (b) stężenia substancji [mg·dm⁻³] w latach 2005-2007

Fig. 2. Curved lines, regression equation and coefficient of determination (a) of the dependence of accumulation of phosphorus relative to the volume of water in the bodies of lake-river system and (b) substance concentrations in 2005-2007

Wnioski

1. W przypadku wód dopływających do jezior zaobserwowano poprawę w zakresie obniżenia stężeń fosforu ogólnego po ich przepłynięcie przez akweny, a utrzymywanie się wysokich koncentracji P_{og} w wodach samych jezior należy wiązać z ich polimiktycznym charakterem - resuspensją osadów.
2. Wyraźnie na tle badanych akwenów wyróżniała się zatoka północna jeziora Nowe Włóki, charakteryzująca się znacznie wyższymi stężeniami P_{og} i $P-PO_4$, co świadczy o znaczącej roli allochtonicznych źródeł fosforu (dopływ fosforu rowem melioracyjnym z terenów nieskanalizowanej wsi).
3. Analiza statystyczna wykazała, że w wodach jezior systemu rzeczno-jeziornego akumulacja fosforu uzależniona była od objętości wody w zbiorniku, a nie od stężenia, co wskazuje na duże możliwości rozcieńczania substancji przedostających się ze zlewni.

Literatura

- [1] Kajak Z. Hydrobiologia: Limnologia. Ekosystemy wód śródlądowych. Warszawa: Wyd Nauk PWN; 2001.
- [2] Hillbricht-Ilkowska A. Shallow lakes in lowland river systems. Role in transport and transformations of nutrients and biological diversity. *Hydrobiology*. 1999;408-409:349-358.
- [3] Bajkiewicz-Grabowska E, Zdanowski B. Phosphorus retention in lake sections of Struga Siedmiu Jezior. *Limnol Review*. 2006;6:5-12.
- [4] Jasiewicz C, Baran A. Rolnicze źródła zanieczyszczenia wód - biogeny. *J Elementol*. 2006;11(3):367-377.
- [5] Hermanowicz W, Dojlido J, Dożańska W, Koziorowski B, Zerbe J. Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków. Warszawa: Wyd Arkady; 1999.
- [6] Bajkiewicz-Grabowska E. Obieg materii systemach rzeczno-jeziornych. Warszawa: Wyd Uniwersytet Warszawski Wydział Geografii i Studiów Regionalnych; 2002.
- [7] Mankiewicz-Boczek J, Gągała I, Kokociński M, Jurczak, T, Stefaniak K. Perennial toxicogenic Planktothrix agardhii bloom in insected lakes of Western Poland. *Environ Toxicol*. 2011;26(1):10-20. DOI: 10.1002/tox.20524.
- [8] Sobczyńska-Wójcik K, Rafałowska M. An assessment of restored water bodies in a river-lake system based on phosphorus concentrations. *Ecol Chem Eng A*. 2011;18(11):1441-1457.
- [9] Koc J, Sobczyńska-Wójcik K, Skwierawski A. Dynamics of phosphorus concentrations in the water of recreated reservoirs in rural areas. *Ecol Chem Eng*. 2007;14(12):1261-1270.

THE CONCENTRATIONS AND ACCUMULATION OF PHOSPHORUS IN WATER OF RESTORED BODIES IN A RIVER-LAKE SYSTEM

Department of Land Reclamation and Environmental Management, Faculty of Environmental Management and Agriculture, University of Warmia and Mazury in Olsztyn

Abstract: As regards lake inflows, a decrease in total phosphorus levels was noted after passage through the water bodies, and high concentrations of total phosphorus could also result from the polymictic character of the studied lakes. The inflows to water bodies that form a chain system supply substantial amounts of total phosphorus to the lakes, leading to excessive phosphorus concentrations in water and speeding up processes which deteriorate water quality and lake functioning. Over a three-year experimental period, the average concentrations of phosphorus, an element limiting primary production, ranged from 0.22 to 0.34 mg P·dm⁻³ in the water bodies within the analyzed river-lake system. Total phosphorus concentrations in the studied water bodies and a statistical analysis of the results suggest that the accumulation of this biogenic element was affected primarily by water volume, which points to the possibility of diluting the substances supplied from the catchment basin.

Keywords: river-lake system, polymictic lakes, phosphorus accumulation

