

FOSFOR W OSADACH DENNYCH POTENCJALNYM ZAGROŻENIEM DLA CZYSTOŚCI WÓD JEZIORA ŚLĄWSKIEGO

Jezioro Śląskie — pochodzenia lodowcowego — jest jeziorem rynnowym. Jezioro to, o pojemności 42 665 mln m³, posiada powierzchnię 817,3 ha i stosunkowo małą zlewnię, która wynosi 207,8 km². Powierzchniowy dopływ wody do jeziora zapewniają głównie dwa dopływy: rz. Czernica i rz. Cienica. Nadmiar gromadzonej wody odpływa z jeziora rzeką Obrzycą do Odry. Z przybliżonych obliczeń wynika, że odpływ wody z jeziora w ciągu roku wynosi około 20 mln m³, stąd pełna jej wymiana w zbiorniku następuje po przeszło 2 latach.

Badania Gołowina i Florczyk [2], przeprowadzone w latach 1973/75 wykazały, że na dno jez. Śląskiego sedymentowało: 1680 i 1617 kg P/rok (fosforu ogólnego), co stanowiło 48‰ i 34‰ fosforu przedostającego się do jeziora z dopływów wód powierzchniowych, wód gruntowych i opadów atmosferycznych. Ilości wytrąconego fosforu mogą być wyższe, np. w zbiorniku Lubachowskim, wg Solskiego [10], wynosiły one 60,3‰, zaś Heidlich [4] za Uhlmanem i Rudolffem [13] podaje, że jezioro zaporało o średniej głębokości 22,5 mln m³ gromadziło w osadach dennych fosfor w 92‰.

Z licznych publikacji wynika, że opadły na dno fosfor w określonych warunkach jest z osadów uwalniany, biorąc udział w tworzeniu biomasy roślin i zwierząt. Jez. Śląskie jest zbiornikiem płytkim (średnia głębokość = 5,2 m), co sprzyja częstemu kontaktowaniu się wód powierzchniowych z osadami dennymi, również w okresie letnim.

W ostatnich latach stwierdzono wyraźne pogorszenie jakości wód tego jeziora, z powodu dopływających zanieczyszczeń z osiedli ludzkich, rolnictwa i przemysłu. Istnieją zatem poważne obawy co do funkcji i znaczącej roli jez. Śląskiego w rozwoju sportów wodnych, rekreacji i turystyki tamtejszego regionu.

Wyniki badań

Skład chemiczny osadów dennych

Próbki osadów dennych, pobrane z 5 stanowisk i z 2 warstw (0—1 cm i 2—5 cm), cechowało duże podobieństwo pod względem zawartości ważniejszych składników chemicznych (tab. 1). Osady wykazały silne zmineralizowanie, zawartość ciał lotnych mieściła się w granicach od 15,9—19,0‰. Głównymi składnikami osadów były: węglan wapnia (49,7—

Tabela 1

SKŁAD CHEMICZNY OSADÓW DENNYCH W JEZ. ŚLĄSKIM

Nr próbki	War- stwa	PO ₄ ‰	CaCO ₃ ‰	Fe (OH) ₃ ‰	Na ‰	K ‰	SiO ₂ ‰	Zwię- żki min. ‰	Ciała lotne ‰
1	a	0,144	59,02	3,12	0,015	0,205	20,27	83,77	17,19
2	b	0,101	59,87	2,60	0,013	0,155	20,01	83,75	16,47
3	a	0,107	58,92	3,10	0,006	0,155	20,33	83,62	17,01
4	b	0,092	57,67	2,85	0,004	0,155	22,40	83,17	16,66
5	a	0,098	57,12	2,81	0,015	0,155	23,17	83,37	17,45
6	b	0,089	49,67	2,53	0,004	0,080	30,77	83,14	17,37
7	a	0,116	50,05	2,98	0,003	0,205	26,55	80,46	19,02
8	b	0,101	49,67	2,94	0,002	0,180	29,01	82,90	18,00
9	a	0,116	51,75	2,98	0,011	0,080	26,56	81,50	18,64
10	b	0,089	51,25	2,15	0,006	0,050	30,84	84,38	15,86

a=0—1 cm, b=2—5 cm

59,9‰) i krzemionka (20,0—30,8‰). Na trzecim miejscu znalazło się żelazo, którego ilości wahały się od 2,15—3,12‰ Fe(OH)₃.

Zawartość fosforu była dość wyrównana (0,089—0,144‰ PO₄) i utrzymywała się poniżej wartości średnich w porównaniu do zawartości fosforu w osadach innych jezior naszego kraju [9].

W warstwie osadów bezpośrednio kontaktującej się z wodą (0—1 cm), zawartości fosforu były nieco wyższe niż w warstwie leżącej kilka centymetrów głębiej. Dokonując ogólnej oceny składu chemicznego pobranych próbek osadów metodą Hove'a, zaklasyfikowano je do typu wapniowo-krzemianowego (Rys. 1).

Sezonowe zmiany zawartości fosforu ogólnego w wodzie jeziora

Przebieg zmian zawartości fosforu ogólnego w wodach jez. Śląskiego, śledzono przez okres 2 lat. Stwierdzono prawidłowość w występowaniu zmian zawartości fosforu w cyklu rocznym, wyrażającą się maksymalnymi jego ilościami w okresach letnich i minimami, przypadającymi na miesiąc maj (rys. 2).

Okres stagnacji letniej w roku 1973 charakteryzował się pojawieniem ostrych deficytów tlenowych w przydennej warstwie wody, np. na stanowisku najgłębszym — stwierdzono całkowity brak tlenu na głębokości 10 m, tj. powyżej 2 m nad dnem. W tym czasie zawartość fosforu w wodzie ogromnie wzrosła, osiągając wartość — 10 445 kg P.

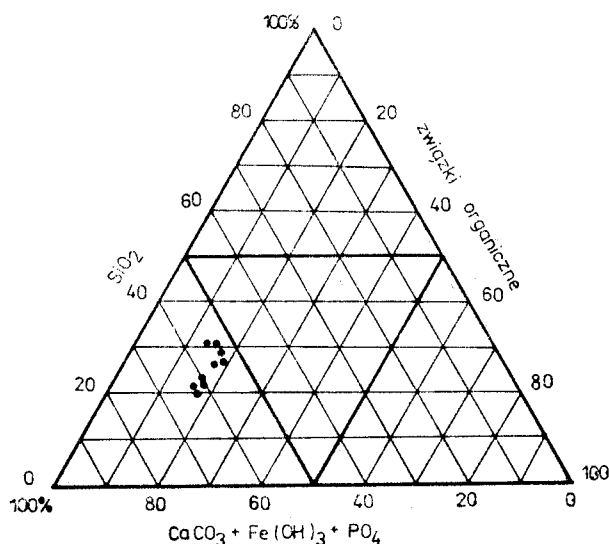
W roku 1974 latem, warunki tlenowe były korzystniejsze i w analogicznym okresie na sta-

NIEKTÓRE DANE KLIMATYCZNE (ŚREDNIE MIESIĘCZNE)
DLA RADZYŃNIA (NAD JEZ. ŚLĄWSKIM)^{a)}

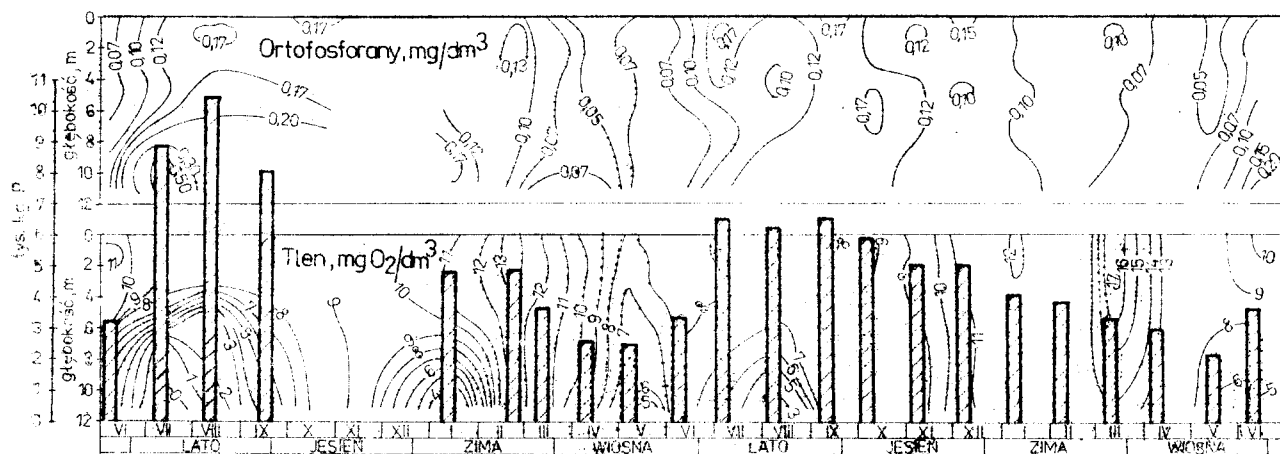
o. E	temp. powietrza °C	temp. wody °C	uśłonecz- nienie godz.	opady mm	siła wiatru m/sek	kierunki wiatrów (przeważa- jące)
rok 1973						
VI	16,7	18,9	242,8	52,7	2,9	NW, W, N
VII	18,3	21,5	224,6	143,2	2,6	SW, NW, S
VIII	17,7	21,0	284,6	9,9	1,9	N, W, S
IX	13,9	17,3	167,8	26,1	2,7	SW, S, W
rok 1974						
VI	14,8	17,5	165,5	68,9	3,0	W, NW, SW
VII	16,1	18,5	149,9	66,7	3,2	W, SW
VIII	18,1	20,5	197,5	109,9	2,3	W, NE, E, N
IX	13,6	17,7	163,7	27,2	2,4	SW, E, S, SE

^{a)} powyższe informacje udestępniała Stacja Badawcza Porewonia IMGW w Radzyńiu

Na szczególną uwagę zasługuje fakt wystąpienia w maju kolejnych dwóch lat (1974 i 1975) najniższych ilości fosforu, które wynosiły: 2 541 kg P i 2 208 kg P. Przyczyną tak silnego



Rys. 1 Typy osadów dennych w jez. Ślawnskim



Rys. 2 Zawartość fosforu ogólnego w wodzie jeziora Ślawnskiego w poszczególnych okresach badawczych na tle sezonowych zmian stężeń tlenu i ortofosforanów, 6.VI.1973—11.VI.1975

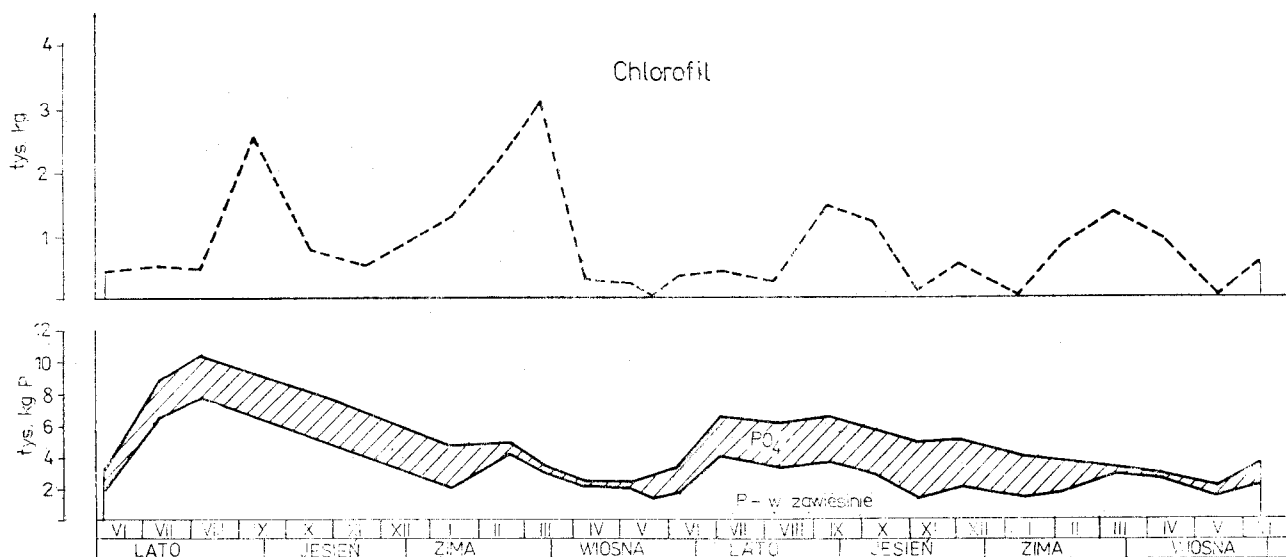
nowisku najgłębszym, na głębokości 10 m, stężenie tlenu rozp. wynosiło 3 mg O₂/dm³. Zawartość fosforu w tym czasie była niższa w porównaniu z rokiem 1973 i pod koniec stagnacji letniej wynosiła 6 537 kg P.

Stagnacje letnie charakteryzował gwałtowny wzrost zawartości fosforu w wodzie w m-cu lipcu. Poziom jego zawartości w pozostałych miesiącach letnich kształtował się różnie i zależał od warunków tlenowych w jeziorze. Wpływ tych warunków na zawartość fosforu w wodzie jeziorowej w okresie letnim znajduje odbicie również w przebiegu zmian stężeń ortofosforanów w profilu pionowym jeziora (rys. 2). Jez. Ślawnskie pozostaje pod silnym wpływem warunków klimatycznych, które kształtują przebieg procesów fizyczno-chemicznych i biologicznych w jeziorze. Stwierdzone różnice w ilościach fosforu uwalnianego z osadów dennych w roku 1973 i 1974 pozostają w ścisłym związku z przebiegiem zmian klimatycznych. Okres stagnacji letniej w roku 1973 był cieplejszy, bardziej uśłoneczniony i mniej wietrzny w porównaniu z latem 1974 roku (tab. 2).

obniżenia zawartości fosforu na wiosnę było biologiczne wytrącenie tego pierwiastka oraz procesy sorpcyjne, zachodzące w warunkach dobrego natlenienia przydennych warstw wody (okres cyrkulacji). Potwierdzeniem znaczącej roli fitoplanktonu w wytrącaniu fosforu jest przebieg zmian zawartości chlorofilu w wodzie, charakteryzujący się wystąpieniem dwóch maksimów chlorofilowych (wiosenny i jesienny) w ciągu roku (rys. 3).

Źródła fosforu w wodzie jeziorowej

Gołowin i Florczyk [2] wyróżnili w jez. Ślawnskim 3 rodzaje źródeł fosforu pochodzenia allochtonicznego: dopływy powierzchniowe, wody gruntowe i opady atmosferyczne (tab. 3). Pod pozycją dopływy powierzchniowe przyjęto fosfor ogólny, który pochodził od ludności miejscowej i przebywającej okresowo, przemysłu i rolnictwa. Łącznie stanowił on w 2 kolejnych latach 84% i 88% fosforu ogólnego przedostającego się w/w drogami do jeziora.



Rys. 3 Zmiany zawartości chlorofilu i fosforu w wodzie jeziora Ślawnickiego, 6.VI.1973–11.VI.1975

Tabela 3

BILANS FOSFORU OGÓLNEGO W JEZ. ŚLAWICKIM, KG P

Treść	rok 1973/74	rok 1974/75
Przychód:		
wody powierzchniowe	2 931,5	4 181,9
wody gruntowe	156,0	143,0
opady atmosferyczne	412,2	425,2
Razem	3 499,5	4 750,1
Rozchód:		
odpływ rz. Obrzyca	1 819,0	3 132,5
Pozostało w jeziorze	1 680,5	1 617,6

Na podkreślenie zasługuje fakt stosunkowo dość znacznego udziału w tym bilansie fosforu pochodzenia atmosferycznego (12% i 9%). Okazało się, że dla jez. Ślawnickiego duże znaczenie ma fosfor gromadzony w osadach dennych. Uwalniany z tych osadów w okresie stagnacji letniej stanowił poważne źródło tego pierwiastka w wodzie jeziorowej. Procesy wymiany składników pokarmowych między osadem i wodą są złożone i nie w pełni jeszcze poznane. W jez. Ślawnickim wystąpiły one wyraźnie na wiosnę i latem.

Zawartość fosforu ogólnego w wodzie jeziorowej, spowodowana wyłącznie uwalnianiem go z osadów dennych w poszczególnych miesiącach lata i na początku jesieni przedstawia tabela 4.

Tabela 4

FOSFOR OGÓLNY POCHODZENIA „WEWNĘTRZNEGO” W WODACH JEZ. ŚLAWICKIEGO, W KG P

m-c	VI	VII	VIII	IX	X
rok					
1973	614	6 184	7 525	—	4 924
1974	683	3 703	3 259	3 456	2 567

Jak widać, wystąpiły istotne różnice w ilościach fosforu latem w roku 1973 i 1974. Maksymalny wzrost obciążenia wód jeziora fosforem pochodzenia „wewnętrznego” wystąpił w lipcu, w następnych miesiącach lata obciążenie

to wzrastało (sierpień, 1973) lub nieznacznie malało (sierpień i wrzesień, 1974). Wyraźny spadek zawartości fosforu w wodzie jeziorowej stwierdzono w październiku (tab. 4). Maksymalne obciążenie wód jez. Ślawnickiego fosforem pochodzącym z osadów dennych charakteryzują następujące wartości:

	sierpień, 1973	lipiec, 1974
mg P/m ² ·d	22,4	12,3

Konfrontując maksymalne ilości fosforu pochodzenia „wewnętrznego” z wielkościami rocznych ładunków fosforu pochodzenia allochtonicznego, stwierdzono, że:

- w roku 1974 był wyższy od fosforu dopływającego z zewnątrz o 74,4%
- w roku 1974 był niższy od fosforu dopływającego z zewnątrz o 22,1%.

Dyskusja

Uzyskane wyniki wskazują, że zawartość fosforu ogólnego w wodzie jez. Ślawnickiego w okresie letnim kształtowała się głównie pod wpływem warunków tlenowych. Największe ilości fosforu wystąpiły w okresie ostrych deficytów tlenowych, wskutek uwalniania tego pierwiastka z osadów dennych.

Fosfor, który wg Olsena [7] został związany w osadach poprzez: 1) biologiczne i metaboliczne procesy bakterii, planktonu i roślin wyższych, 2) chemiczne reakcje z wapniem, glinem i żelazem oraz 3) sorpcję, może być w określonych warunkach uwalniany do wody. Wg Hayesa i innych [3], w procesie wymiany fosforu bierze udział warstwa osadu grubości 1 mm, z kolei Bortleson [1] i Sridharan [11] twierdzą, że procesy te mogą sięgać głębokości kilkunastu cm.

Zjawisko wiązania i uwalniania fosforu z dna Mortimer [6] przypisuje koloidalnym kompleksom żelaza, które w natlenionym osadzie stanowią barierę dla wymiany soli pokarmowych między osadem i wodą.

W przypadku warunków anaerobowych na powierzchni osadów jon żelazowy (Fe^{3+}) jest redukowany do jonu żelazowego (Fe^{2+}) i wówczas sorpcyjne koloidy zostają zerwane, uwalniając uwieszone sole do wody.

Ważnym czynnikiem regulującym wymianę rozpuszczonego fosforu z osadów do wody i odwrotnie jest zdaniem Mortimera potencjał redox. Hillerod [5], który przebadal 6 płytkich jezior duńskich stwierdził, że wzrost fosforu łątem w wodach tych jezior do $1,2 \text{ g P/m}^2 \cdot \text{miesiąc}$, był spowodowany warunkami beztlenowymi. Uwalnianie fosforu z dna do wody wyjaśnia podobnie jak Mortimer obniżeniem potencjału redox (poniżej 100—200 mV) i redukcją Fe (III) do Fe (II). Ponadto uważa, że uwalnianie fosforu z osadów może odbywać się również w przypadku wysokich pH i wówczas zostaje naruszony kompleks sorpcyjny fosforu z glinien ($\text{Al}(\text{OH})_3$).

Ventz [14] wykazał prostą zależność pomiędzy stężeniem tlenu w hypolimnionie a zawartością ortofosforanów. Dla jez. Scharmützel zależność tę wyraził następującym równaniem: $\text{o-PO}_4 = 0,538 \cdot e^{-0,333 \text{ O}_2}$. Ilości uwalnianego fosforu z dna do wody mogą być różne, co przedstawia tabela 5.

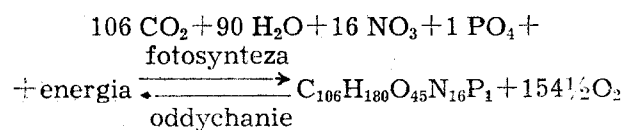
Tabela 5

OBCIĄŻENIE „WEWNĘTRZNE” WÓD KILKU JEZIOR FOSFOREM (POCHODZĄCYM Z OSADÓW DENNYCH)		
Ilość uwolnionego fosforu $\text{mg P/m}^2 \cdot \text{d}$	Autor	Uwagi
0,3	Stumm i Leckie (Ventz, 1976)	
5,7—17,5	Tessenow (1972)	pH=6,5
12 i 17	Kamp-Nielsen (1974)	dane dla 2 jezior (pH=7,0—8,2)
do 40	Hillerod (1976)	dane dla 6 jezior

Uzyskane dla jez. Sławskiego wyniki: $12,3$ i $22,4 \text{ mg P/m}^2 \cdot \text{rok}$ są zbliżone do danych zamieszczonych w tabeli 5.

Ruttner [8] i wielu innych badaczy uważa osady jeziorne za ważne źródło soli pokarmowych w tworzeniu biomasy roślin i zwierząt.

Wg Stumma [12] syntezę związków organicznych przez fitoplankton i zapotrzebowanie na elementy biogenne można przedstawić równaniem:



Z powyższego wynika, że na 1 g fosforu związanego w materii organicznej powstaje około 160 g tlenu; w przypadku rozkładu tej materii, zużycie takiej samej ilości tlenu.

Fosfor zawarty w wodzie jeziorowej może wielokrotnie brać udział w tworzeniu biomasy organizmów wodnych. Dla większości europejskich jezior eutroficznych jest on czynnikiem limitującym rozwój roślin [13]. Z tych też względów, chcąc zahamować aktywność autotrofów i dalszy postęp eutrofizacji jez. Sławskiego, zachodzi potrzeba ograniczenia dopływu do jego wód fosforu ze wszelkich możliwych źródeł.

Wnioski

1. Powierzchnia, kształt, głębokość i położenie geograficzne jez. Sławskiego sprzyjają wielokrotnemu i gruntownemu mieszaniu się jego wód podczas stagnacji letniej.
2. Wskaźniki chemiczne i biologiczne, charakteryzujące wody tego jeziora kwalifikują je do grupy jezior eutroficznych.
3. Wapniowo-krzemianowy typ osadów dennych, mała zawartość w nich substancji lotnych, wskazują na dość intensywny przebieg procesów rozkładu związków organicznych w jeziorze.
5. Uruchamianie fosforu z osadów dennych odbywa się w warunkach anaerobowych. Maksymalne ilości uwolnionego z dna fosforu wynosiły: $7\,525 \text{ kg P}$ (sierpień, 1973) i $3\,703 \text{ kg P}$ (lipiec 1974).
6. Fosfor pochodzenia „wewnętrznego” stanowi potencjalne zagrożenie dla czystości wód jez. Sławskiego z powodu łatwego uwalniania się z osadów do wody ($22,4 \text{ mg P/m}^2 \cdot \text{d}$) i możliwości wielokrotnego udziału w procesie syntezy związków organicznych.

LITERATURA

1. G.C. BORTLESON: Use of lake sediment cores to estimate eutrophication. Ph. D. thesis in progress, Water Chemistry, University of Wisconsin, Madison, 1970.
2. S. Golowin, H. Florczyk: Badania nad określeniem stopnia eutrofizacji i metod jej kontroli w zbiornikach wodnych. Sprawozd. końcowe z realizacji tematu PR-5-532-4, IMGW, Warszawa-Wrocław, 1930.
3. F. R. HAYES, J. A. McCarter, M. L. CAMERON, D. A. LIVINGSTONE: On the kinetics of phosphorus exchange in lakes. J. Ocol. 40, 1952, 202—216.
4. R. HEIDLICH: Untersuchungen über den Phosphathaushalt der Seidenbachtalsperre (Erzgebirge) und ihrer Vorbecken. Forsch. Ber. Zool. Inst., Leipzig, 1963.
5. J. M. A. HILLEROD: Nitrogen and phosphorus budgets and the role of sediments in six shallow Danish lakes. Arch. Hydrob., 74, 4, 1974, 528—550.
6. C. H. MORTIMER: The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. Ecology, 29, 1941, 280—329; 30, 1942, 147—201.
7. S. OLSEN: Recent trends in the determination of orthophosphate in water. USA Atm. Energy Comm. Contr. NOAT, 1966, 1—45.
8. F. RUTTNER: Fundamentals of limnology. University of Toronto Press, Toronto, 1963.
9. A. SOLSKI: Szkic limnologiczny jezior charkowskich i jez. Wzdzydze. Pol. Arch. Hydrob., XII, 2, 1964, 189—231.
10. A. SOLSKI: Rola fosforu w eutrofizacji zbiornika Lubachowskiego. Mat. Bad. IGW, Ochrona wód przed zanieczyszczeniem, Nr 5, 1971, 1—24.
11. L. SRIDHARAN: Aqueous environmental chemistry of phosphorus in Lower Green Bay; Ph. D. Thesis in progress, Water Chemistry, University of Wisconsin, Madison, 1970.
12. W. STUMM: Diskussionsbeitrag zu G. A. Röhlich: methods for removal of phosphorus and nitrogen from sewage plant effluents. Awanc. Water Pollution Res., 2, 1964, 216—230.
13. D. UHLMAN, R. RUDOLF: Impediment of eutrophication by the removal of biogenic elements. Sanit. i Techn. Hidrobiologija, Izd. Nauka, Moskwa, 1967, 37—43.
14. D. VENTZ: Studien zur Typologie von baltischen Seen unterschiedlichen Eutrophierungsgrades. Int. Revue ges. Hydrob., 61, 2, 1976, 183—191.