

WSPÓŁCZYNNIKI JEDNOSTKOWEGO ODPIYU FOSFORU I AZOTU Z WYBRANYCH ZLEWNI OBSZARU POLSKI

Przebadano odpływy fosforu i azotu w 26 zlewniach charakteryzujących się różnym rodzajem i stopniem zagospodarowania oraz zróżnicowanymi cechami geomorfologicznymi. W oparciu o wyniki badań przeprowadzone w cyklach rocznych i 2-letnich określono jednostkowe współczynniki odpływu fosforu i azotu oraz próbowano określić czynniki decydujące o wielkości odpływu tych substancji.

Określenie rzeczywistego i potencjalnego zagrożenia jakości wód powierzchniowych przez różne źródła zanieczyszczenia ma podstawowe znaczenie nie tylko dla bieżącej ochrony, ale również dla możliwości prognozowania jakości istniejących i projektowanych zasobów wodnych.

Jednym z czynników najpoważniej zagrażających jakości wód powierzchniowych, a w szczególności wód stojących, są substancje biogenne. Nadmierne obciążenie nimi może powodować przyspieszenie tempa przebiegu procesu eutrofizacji, prowadząc w konsekwencji do znacznego pogorszenia jakości objętych tym procesem wód i do wykluczenia możliwości ich gospodarczego wykorzystania.

Ustalenie wielkości ładunków odprowadzanych ze źródeł punktowych do odbiornika jest na ogół sprawą metodycznie i technicznie prostą. Dopuszczalne powierzchniowe obciążenia wód stojących substancjami biogennymi, w zależności od konkretnych warunków, mogą być jednak tak niskie, że przedsięwzięcia ochronne polegające na zlikwidowaniu obciążeń, pochodzących ze źródeł punktowych stają się niewystarczające. Wówczas należy przeanalizować obciążenia ładunkami, pochodzącymi ze źródeł obszarowych, co stanowi znacznie bardziej skomplikowany problem.

Przez zanieczyszczenia obszarowe, w przeciwieństwie do punktowych, rozumie się wszystkie te zanieczyszczenia, które z rozpatrywanego terenu przedostają się do odbiornika w sposób przestrzennie mniej więcej równomierny, a ich powstawanie, czy wprowadzanie na badany teren, obejmuje również mniej więcej równomiernie cały obszar.

Do zanieczyszczeń obszarowych zalicza się:

— naturalne spływy substancji, pochodzące z nie skażonych (nie zagospodarowanych) zlewni w wyniku erozji i zmywania gleby, obciążenia naniesione przez wiatr i opady

atmosferyczne oraz powstające z rozkładu roślinności itp.

— napływ substancji nie związanych z punktowymi źródłami zanieczyszczenia, stanowiących obciążenie wynikające z działalności człowieka, uzależnione od stopnia i rodzaju zagospodarowania zlewni, a zwłaszcza wynikające ze stosowania nawozów sztucznych i naturalnych oraz środków ochrony roślin.

Źródła obszarowe obejmują zatem niepunktowy napływ substancji z ziemi i powietrza. W ostatnim czasie znaczenie źródeł obszarowych w ogólnym obciążeniu wód substancjami biogennymi znacznie wzrosło na skutek intensyfikacji rolnictwa i na skutek zwiększonego zanieczyszczenia atmosferycznego.

Nawozy sztuczne oraz nawóz naturalny, spływające z obszaru zlewni we wzrastających ilościach, stanowią coraz poważniejsze źródło zagrożenia wód. Wielkość obciążenia substancjami biogennymi, pochodzącymi ze źródeł obszarowych zależy od warunków regionalnych, a więc od takich czynników, jak: klimat, konfiguracja terenu, warunki hydrologiczne, typy gleb oraz sposób zagospodarowania w danym regionie. Wpływ źródeł obszarowych w wielu przypadkach, w zależności od warunków lokalnych może stać się równoważny wpływowi źródeł punktowych lub nawet go przewyższać.

Wielkość zanieczyszczeń obszarowych, odpływających z obszaru zlewni charakteryzowana jest jednostkowym wskaźnikiem odpływu analizowanej substancji wyrażonym w kg/ha.r, do wyznaczenia którego niezbędna jest znajomość rocznych wielkości ładunków oraz powierzchni zlewni, z której odpływały.

Prawidłowe określenie wielkości zanieczyszczeń obszarowych i ustalenie dla nich jednoznacznych wskaźników odpływu, wiąże się z reguły z poważnymi trudnościami metodycznymi

i technicznymi. Trudności w interpretacji są wywołane przede wszystkim przez fakt, że z całego kompleksu czynników, wywierających wpływ na wielkość odpływających ładunków zanieczyszczeń, decydującą rolę mogą w różnych warunkach odgrywać różne czynniki, z reguły nie pojedynczo lecz w różnych układach, zależnie od lokalnych i aktualnych warunków. Dlatego też, bardzo często wyniki i wnioski różnych autorów nie potwierdzają się w badaniach przeprowadzonych na innych obszarach lub w innych warunkach a ustalone przez różnych autorów charakterystyczne wskaźniki odpływu wykazują bardzo dużą rozpiętość, a nawet rozbieżności, co niekiedy mogłoby podważać celowość ich wyznaczania jako aktualnych poza terenem, dla którego zostały ustalone i dla innych warunków niż panujące w czasie przeprowadzonych badań. Do znacznej rozpiętości wyników przyczyniają się też bez wątpienia różnice w metodyce prowadzonych badań, uniemożliwiające niekiedy przeprowadzenie porównań czy uogólnień wyników uzyskanych przez różnych autorów.

Uciążliwość tego typu badań, czas potrzebny do ich przeprowadzenia oraz związane z tym nakłady finansowe uniemożliwiają często bezpośrednie wyznaczenie rzeczywistych ładunków dla poszczególnych, rozpatrywanych obiektów. Dąży się więc do opracowania modeli prognostycznych, których skonstruowanie i zastosowanie wymaga jednak znajomości współczynników odpływu dla poszczególnych substancji [1]. Zanieczyszczenia obszarowe stały się zagadnieniem, któremu powinno się [10] i w ostatnim 20-leciu poświęca się coraz więcej uwagi, na temat którego ukazuje się coraz więcej publikacji gdyż uważa się, że do ustalenia współczynników „eksportu” dojść można wyłącznie drogą wielostronnych badań, umożliwiających uchwycenie czynników warunkujących ich wielkość.

Współczynniki jednostkowego odpływu fosforu i azotu z wybranych zlewni o zróżnicowanym sposobie zagospodarowania

W latach 1973—80 Zakład Badania Jakości Zasobów Wodnych IMGW we Wrocławiu przeprowadził badania wielkości odpływu zanieczyszczeń obszarowych z 26 zlewni o różnej charakterystyce i zróżnicowanym sposobie zagospodarowania. Programem badawczym objęto trzy typy zlewni:

górskie [2] reprezentowane przez 9 zlewni częściowych: 3 rzeki Kamiennej (rejon Karłonoszy Zachodnich), 2 Morawki (rejon Masywu Śnieżnika), oraz 4 górnej Bystrzycy (rejon Gór Sowich),

podgórskie [3], obejmujące 5 zlewni częściowych rzeki Piaseczna (Pogórze Kaczawskie),

nizinne [5, 3], reprezentowane przez 12 zlewni częściowych (3 rzeki Obrzycy — Poje-

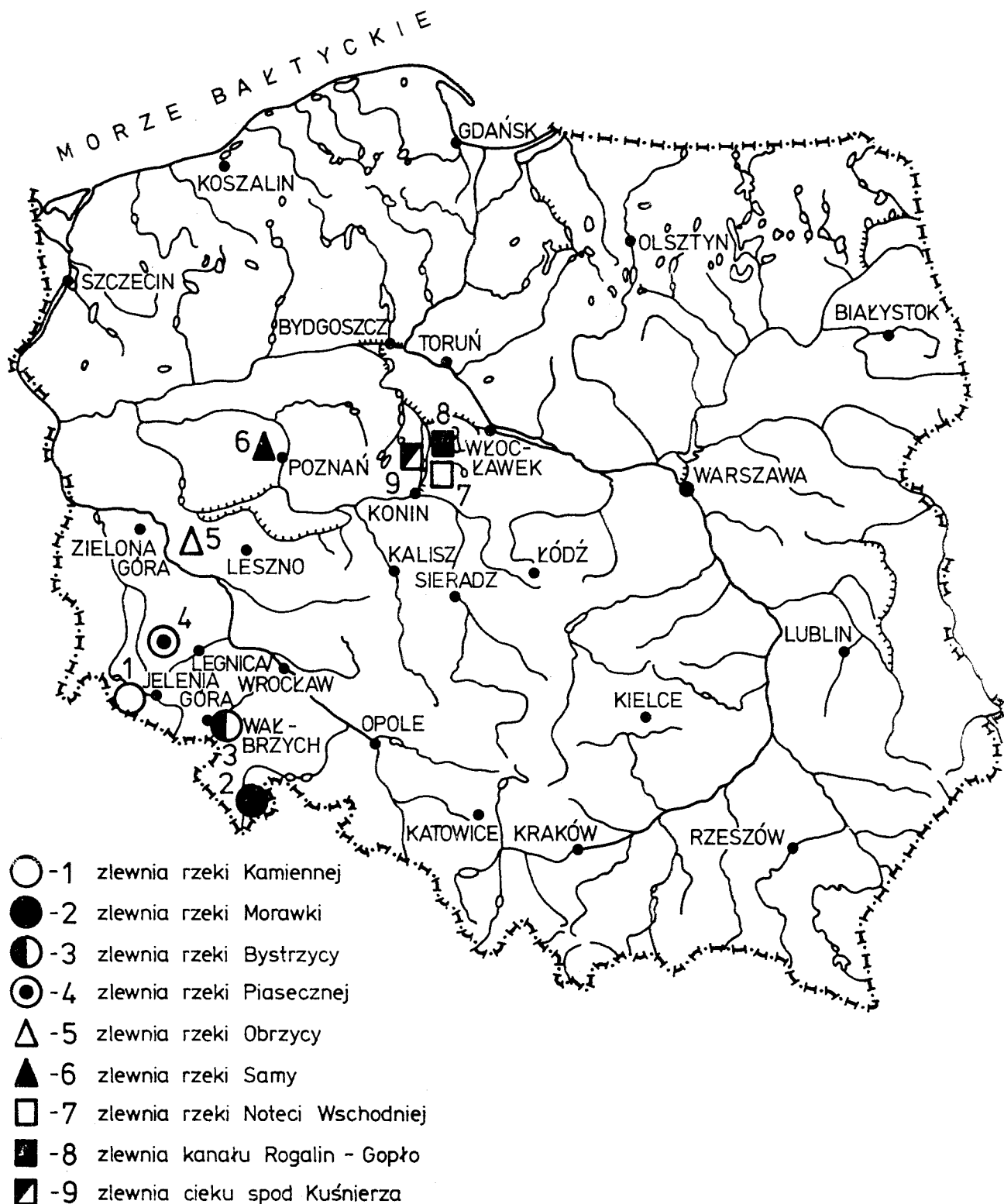
zierze Lubuskie, 3 rzeki Samy — Pojezierze Poznańskie, 2 górnego biegu Noteci Wschodniej, 2 kanału Rogalin — Gopło, 2 cieków spod Kuśnierza — Pojezierze Kujawskie). Ogólną lokalizację wymienionych zlewni przedstawia rys. 1.

Metodyka badań

Ładunki fosforu i azotu odpływające z obszarów wymienionych zlewni ustalono na podstawie wyników systematycznych, wykonywanych 2-4 razy w miesiącu, oznaczeń zawartości analizowanych substancji w wodach przepływających przez przekroje zamykające zlewnie cząstkowe. W momencie poboru próbek wody wykonywano pomiary natężenia przepływu oraz prowadzono codzienne pomiary stanów wody, niezbędne do wyznaczenia codziennych wartości natężenia przepływu. Dane stanowiące podstawę do wyznaczania codziennych przepływów otrzymywano z obserwacji wodowskazowych, pomiarów na przelewach mierniczych, bądź metodą pośrednią za pomocą podstawionego naczynia. Metoda pomiaru była uzależniona od wielkości przepływu w danym cieku. Pobrane próbki wody analizowane były na zawartość fosforu całkowitego i azotu całkowitego.

Charakterystykę badanych zlewni opracowano w oparciu o istniejące materiały, wykonane dokumentacje i na podstawie bezpośrednich wywiadów w terenie. Charakterystyka zlewni częściowych uwzględniała: topografię, morfologię, hydrogeologię, hydrografię, klimat oraz sposób ich zagospodarowania. Dane dotyczące stanu zagospodarowania zlewni stanowiły podstawę do wyznaczenia, metodą wskaźnikową, globalnej wielkości ładunku fosforu i azotu wytwarzanego i zużywanego w rozpatrywanych zlewniach w wyniku obecności człowieka i prowadzonej przez niego działalności gospodarczej. Ładunki wytwarzane, ustalono w oparciu o znajomość: stanu zaludnienia i wielkości wskaźnikowe określone przez Liebmann, [8] 3,0 g P/M.d i 12 g N/M.d, stanu hodowli i wartości wskaźnikowe ustalone przez Vollenweidera, [9] i Hamma, [6]/1 koń — 11,4 kg P/r i 76,8 kg N/r, 1 sztuka bydła — 7,65 kg P/r i 70,2 kg N/r, 1 sztuka trzody chlewnej — 5,63 kg P/r i 18,93 kg N/r, 1 owca — 1,50 kg P/r i 8,93 kg N/r oraz 1 kura — 0,2 kg P/r, 0,55 kg N/r. Wielkość ładunków fosforu i azotu wprowadzaną w wyniku sztucznego nawożenia określono w oparciu o statystyczne dane wskaźnikowe ustalone dla poszczególnych zlewni. Określone wielkości rocznych ładunków fosforu i azotu wytwarzanych i zużywanego w analizowanych zlewniach, stanowiły podstawę do sporządzenia bilansu tych związków oraz do określenia jednostkowego obciążenia zlewni wytwarzanym i zużywanym ładunkiem (w t/km².r).

Większość wytypowanych zlewni badano w zamkniętych cyklach dwuletnich, a tylko dla niektórych ograniczono program do jednego roku.



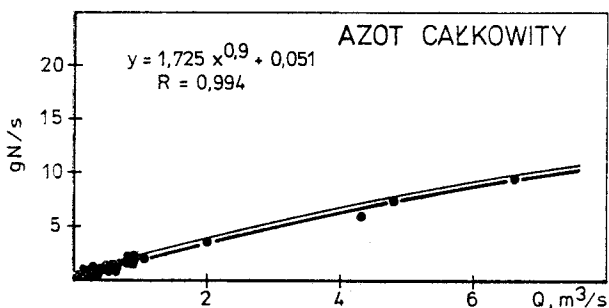
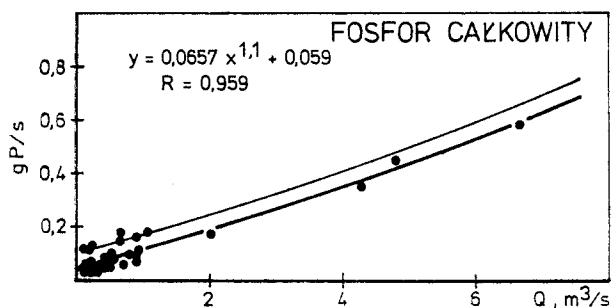
Rys. 1 Ogólna lokalizacja badanych zlewni podstawowych i ich oznakowanie

Jakość badanych wód i stopień ich obciążenia badanymi substancjami określono w oparciu o zależności ustalone pomiędzy stężeniem badanych substancji i natężeniem przepływu jak również na podstawie zależności pomiędzy wielkością prowadzonego ładunku zanieczyszczeń a natężeniem przepływu. Ze względu na fakt, że dla większości analizowanych przypadków nie uzyskano wiarygodnej

zależności pomiędzy stężeniem zanieczyszczeń a natężeniem przepływu, oparto się na zależności między wielkością prowadzonych ładunków chwilowych a towarzyszącymi im wielkościami przepływu. Roczny ładunek stanowiący podstawę do wyznaczenia wielkości jednostkowego wskaźnika odpływu danej substancji, ustalono w oparciu o znajomość codziennych wielkości przepływów w badanych przekrojach.

Na ich podstawie, z równań określających zależność pomiędzy ładunkiem chwilowym rozpatrywanych wskaźników zanieczyszczenia a wielkością przepływu odtworzono wielkości ładunków dobowych. Suma ładunków dobowych dla rocznego cyklu badań określa wielkość rocznego ładunku analizowanych substancji. Jednostkowy wskaźnik odpływu danej substancji otrzymano dzieląc ładunek roczny przez powierzchnię zlewni. Z otrzymanych układów punktów przedstawionych przykładowo na rys. 2 wynikało, że zależność pomiędzy ładunkiem a przepływem można było opisać zmodyfikowaną wersją modelu regresyjnego RLQ [7], nazwą AREQ [11]. W modelu tym przyjmuje się, że zależność pomiędzy ładunkiem i przepływem jest opisana wzorem: $L = a + b \cdot Q^{c_{\max}} + \varepsilon$, w którym ε określa wpływ przypadkowych czynników, $c_{\max}$ jest tą wartością wykładnika (z ciągu 15 wykładników zadanych), dla którego współczynnik korelacji jest największy, zaś współczynniki prostej regresji a i b wyznaczone są przy pomocy najmniejszych kwadratów. Dla ładunków prognozowanych w ten sposób, że oblicza się górną granicę przedziału ufności przy zadanym poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Granicę tę liczy się klasyczną metodą, dodając do prognozowanej wartości ładunku iloczyn odpowiedniego kwantyla rozkładu Studenta i pierwiastka z wariancji.

Mając wielkości codziennych przepływów $x_1, \dots, x_m$ oraz znaną zależność między ładunkiem i przepływem wyznaczoną na podstawie wyżej



Rys. 2 Zależności pomiędzy ładunkiem fosforu i azotu a natężeniem przepływu dla wód rzeki Noteci Wschodniej w przekroju Mąkoszyn

podanego wzoru, oblicza się całkowity ładunek
$$M$$
 roczny
$$CRL = g \cdot \sum_{m=1} L(x_m)$$
 w którym $g = 0,0864$

(gdy CRL wyraża się w tonach a natężenie przepływu w m^3/s), a M jest liczbą dni w roku. Zależności pomiędzy ładunkami analizowanych substancji a przepływem ustalono w każdym przekroju dla zbioru danych z całego okresu obserwacji, co uzasadnione było faktem, że układy punktów, wyznaczające analizowane zależności nie wykazywały zróżnicowania dla poszczególnych lat, lecz tworzyły jedną wspólną zależność.

Ogólna charakterystyka badanych zlewni

Rozpoznanie zlewni przyjętych jako reprezentatywne do badań nad ustaleniem wielkości odpływu fosforu i azotu wykazało ich duże zróżnicowanie pod względem morfometrycznym oraz rodzaju i intensywności zagospodarowania.

Powierzchnie badanych zlewni cząstkowych wynosiły od 0,9 do 306,0 km^2 , w tym: zlewnie cząstkowe rzeki Kamiennej od 1,2—5,0 km^2 , rzeki Morawki 14,3—17,5 km^2 , rzeki Bystrzycy 0,9—128,9 km^2 , rzeki Piasecznej 1,6—11,2 km^2 , rzeki Obrzycy 16,2—56,2 km^2 , rzeki Samy 5,4—9,6 km^2 , rzeki Noteci Wschodniej 189,0 i 306,0 km^2 , kanału Rogalin — Gopło 27,7 i 58,5 km^2 oraz cieku spod Kuśnierza 32,8 i 42,8 km^2 .

Średni spadek zlewni kształtuje się w granicach od 2,5 do 218‰. Największe spadki, w przedziale wartości 22 do 218‰ charakteryzują zlewnie cząstkowe górskie, natomiast najniższe spadki od 2,5—5,9‰ występują w zlewniach nizinnych Noteci Wschodniej.

Wskaźnik wartości zlewni zmienia się od 0,45 do 1,69 przy czym wartości niższe od 1,05 występują w zlewniach nizinnych. W zlewniach górskich zmienność tego wskaźnika mieści się w przedziale 1,15 do 1,68 dla podgórskich 1,07—1,69.

Współczynnik gęstości sieci rzecznej w poszczególnych zlewniach waha się od 0,35 km/km^2 dla zlewni w rejonie Obrzycy do 10,0 km/km^2 w zlewni cząstkowej rzeki Kamiennej. Zmienność tego parametru jest następująca: dla zlewni górskich 0,93 do 10,0 km/km^2 , podgórskich od 0,62 do 1,55 km/km^2 , a dla zlewni nizinnych 0,35 do 1,94 km/km^2 .

Procentowy udział terenów wykorzystywanych rolniczo, w badanych zlewniach cząstkowych kształtuje się od 47—96%, za wyjątkiem zlewni cząstkowych Kamiennej, dwóch zlewni Morawki i jednej w zlewni Bystrzycy, na obszarze których nie występują tereny wykorzystywane rolniczo. Najwyższy stopień rolniczego wykorzystania charakteryzuje zlewnie cząstkowe rzeki Samy i kanału Rogalin—Gopło (ok. 96% użytków rolnych); najniższy natomiast zlewnie górskie rejonu Bystrzycy (ok. 48% użytków rolnych). Na obszarach pozostałych zlewni cza-

stkowych procentowy udział użytków rolnych zmienia się od 64,5—91,1⁰/.

Udział lasów na rozpatrywanych obszarach zlewni cząstkowych wykazuje wyjątkowo duże zróżnicowanie od 0,2 do 100⁰/ przy czym największe zalesienie 97—100⁰/ występuje w zlewniach cząstkowych Kamiennej i w jednej zlewni cząstkowej rzeki Bystrzycy, a najmniejsze w zlewni cząstkowej rzeki Samy. Najniższy stopień zalesienia cechuje zlewnie podgórskie i nizinne, w których lasy zajmują 0,2—37,5⁰/ ich łącznej powierzchni.

W zlewniach cząstkowych rzeki Kamiennej i Morawki występują gleby wietrzelinowe, rzeki Bystrzycy gliniasto-pylaste i skaliste. Na obszarach zlewni rzeki Piasecznej dominują gleby brunatne i bielcowe, w zlewniach Obrzycy — bielcowe i brunatne, a w zlewniach cząstkowych rzeki Samy gleby bielcowe, pseudobielcowe i czarne ziemie. Obszary analizowanych zlewni Noteci Wschodniej pokrywają głównie gleby piaskowe różnych typów oraz gleby bielcowe z udziałem ziem czarnych. W zlewniach Kanału Rogalin—Gopło przeważają czarne ziemie właściwe, czarne ziemie zdegradowane i szare, a w zlewni cieków spod Kuśnierza — bielcowe i pseudobielcowe ze znacznym udziałem czarnych ziem zdegradowanych i szarych.

Na powierzchniach zajmowanych przez grunty orne uprawia się 4 zboża, ziemniaki oraz rośliny przemysłowe i pastewne. Uprawy zbóż w analizowanych zlewniach (za wyjątkiem górskich zlewni zalesionych) zajmują 6,6—76,6⁰/ powierzchni gruntów ornych w tym pszenica od 12,1—72,2⁰/.

Największy udział gruntów przeznaczony pod uprawy roślin pastewnych i przemysłowych (głównie buraków) występuje w zlewniach rzeki Piasecznej.

Wskaźnik gęstości zaludnienia wynosi od 0 do 167 M/km².

Zlewniami nie zasiedlonymi są głównie zlewnie cząstkowe górskie których tereny pokryte są lasami. Duże zróżnicowanie pod względem zaludnienia wykazują zlewnie cząstkowe rzeki Bystrzycy od 0—163 M/km², rzeki Piasecznej od 0—167 M/km², Obrzycy od 10—64 M/km² oraz Samy od 12—123 M/km². Zlewnie położone w zlewni Noteci Wschodniej charakteryzuje wskaźnik gęstości zaludnienia na poziomie 84 M/km², kanału Rogalin—Gopło od 59—91 M/km² oraz cieków spod Kuśnierza 47 M/km².

Obciążenie badanych zlewni ładunkiem fosforu pochodzącego od ludności, z rolnictwa i hodowli zmienia się w granicach od 0 do 55 t P/km²/rok, w zasiedlonych zlewniach rzeki Bystrzycy 0,9—1,1 t P/km²/rok, w zlewniach cząstkowych rzeki Piasecznej 2,2—4,3 t P/km²/rok, w zlewniach Obrzycy 1,9—3,9 t P/km²/rok, w zlewniach Samy 30—55 t P/km²/rok oraz w zlewniach noteckich 3,1 do 4,3 t P/km²/rok. Najmniej zróżnicowane obciążenie wykazują zlewnie rzeki Bystrzycy (za wyjątkiem zlewni leśnej) oraz zlewnie Noteci Wschodniej, Kanału Rogalin—Gopło i cieków spod Kuśnierza. Obciążenie ładunkiem azotu waha się od 0—132 t

N/km²/rok, przy czym największe obciążenie występuje w zlewniach cząstkowych rzeki Samy 97—132 t N/km²/rok. Obciążenie azotem zlewni noteckich jest bardzo mało zróżnicowane i wynosi dla Noteci Wschodniej ok. 12,7 t N/km²/rok, dla kanału Rogalin—Gopło ok. 16,5 t N/km²/rok oraz dla cieków spod Kuśnierza 15,0 t N/km²/rok. W zlewniach Obrzycy obciążenie azotem waha się od 6,0 do 15,6 t N/km²/rok, w zlewniach Piasecznej od 9,7 do 40,0 t N/km²/rok, a w zlewniach rzeki Bystrzycy (z udziałem pól uprawnych) od 4,0 do 5,4 t N/km²/rok.

W ogólnym obciążeniu analizowanych zlewni ładunkiem fosforu, największy udział ma rolnictwo przez co należy rozumieć ładunek wprowadzany w wyniku stosowania nawozów sztucznych. Drugie miejsce pod względem wielkości wytwarzanego ładunku substancji biogenych zajmuje hodowla, a trzecie przypada na ludność. W przypadku azotu, największy ładunek pochodzi z hodowli, a następnie z rolnictwa i od ludności. Ogólnie można przyjąć, że dominującą rolę w obciążeniu badanych zlewni substancjami biogennymi odgrywa rolnictwo i hodowla.

Wskaźniki jednostkowego odpływu fosforu i azotu

Dane przedstawione w tablicy 1 mogą sugerować, że wielkości jednostkowych współczynników odpływu azotu zależą nie tyle od sposobu zagospodarowania zlewni (wyrażonego procentowym udziałem użytków i lasów) co od typu zlewni (górska, podgórska, nizinna). Współczynniki te (największe wartości, dochodzące do 27,3 kg/ha/rok), osiągają dla zlewni górskich, niezależnie od stopnia ich zalesienia i udziału w nich użytków rolnych. Najniższe współczynniki odpływu, w zakresie 0,6—7,8 kg/ha/rok otrzymano dla zlewni nizinnych. Grupę pośrednią stanowiły zlewnie podgórskie ze współczynnikami odpływu w zakresie 2,6—18,4 kg N/ha/rok. Dla tej grupy zlewni, charakteryzujących się prawie takimi samymi parametrami morfometrycznymi, warunkami hydrogeologicznymi i rodzajem podłoża (zlewnie podstawowe rz. Piasecznej) stwierdzono jednoznaczność zależności pomiędzy wielkością wskaźników jednostkowego odpływu a udziałem użytków rolnych, wyrażoną równaniem

$$y = 0,131 \cdot 10^{-8} \cdot x^{5,19} \text{ o współczynniku korelacji } 0,985$$

(w którym y — współczynnik odpływu azotu w kg N/ha/rok

x — udział użytków rolnych w procentach.

Dla zlewni nizinnych zależność tę o znacznie niższym współczynniku korelacji 0,720 opisuje równanie

$$y = 0,912 \cdot 10^{-5} \cdot x^{2,88}$$

Dla zlewni górskich nie otrzymano podobnej zależności.

Silnie zróżnicowane współczynniki jednostkowego odpływu fosforu nie wykazują ścisłej zależności ani od sposobu użytkowania ani też

WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKÓW JEDNOSTKOWEGO ODPIYU SUBSTANCJI BIOGENNYCH (P i N)
ZE ZLEWNI O RÓŻNYM ZAGOSPODAROWANIU

Tabela 1

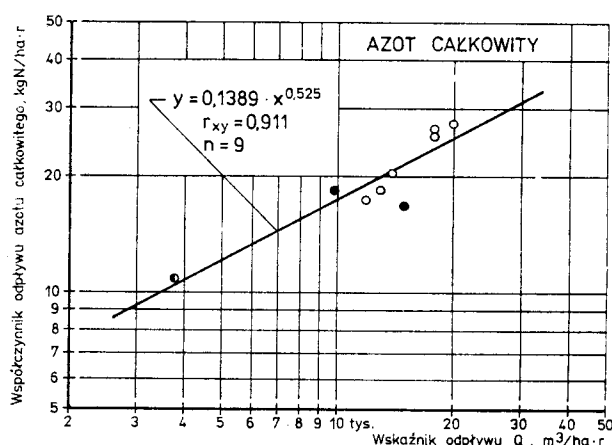
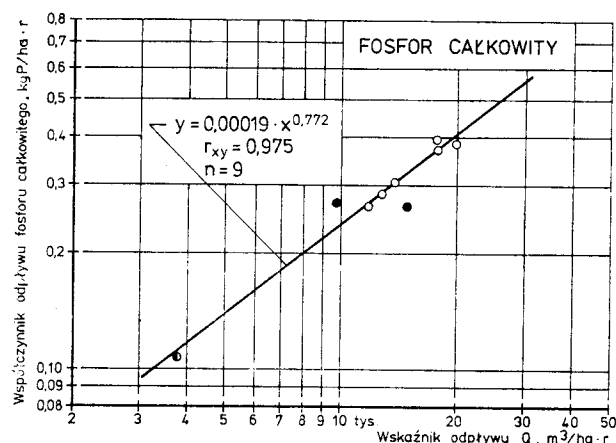
Typ zlewni	Zlewnia podstawowa	Ilość rozpatrywanych zlewni	% udziału użytków rolnych	% udziału lasów	współczynnik jednostkowego odpływu	
					kg P/ha/rok	kg N/ha/rok
górska	rz. Kamienna	3	—	96—100	0,265—0,393	17,4—27,3
	rz. Morawka	2	0,7—0,8	60—75	0,267—0,442	16,6—23,6
	rz. Bystrzyca	1	—	97	0,186	10,9
	rz. Bystrzyca	3	47—49	43—45	0,109—0,540	7,1—23,3
podgórska	rz. Piaseczna	5	65—91	5—34	0,044—0,628	2,6—18,4
nizinna	rz. Obrzyca	3	57—79	12—38	0,040—0,528	0,6—5,9
	rz. Sama	3	77—96	0—10	0,014—0,300	1,8—4,8
	rz. Noteć Wschodnia	2	80—81	10—11	0,081—0,094	1,7—2,0
	ciek spod Kuśnierza	2	83—85	11—13	0,171—0,193	3,0
	kanal Rogalin-Gopło	2	95—96	1—1,4	0,550—0,635	6,0—7,8

od typu zlewni. Wyłącznie dla zlewni podgórskich i nizinnych (po wykluczeniu wyników otrzymanych dla dwu zlewni rzeki Samy) otrzymano zarysowującą się wspólną zależność pomiędzy współczynnikiem jednostkowego odpływu a procentowym udziałem użytków rolnych. Zależność tę przy współczynniku korelacji 0,602 wyraża równanie $y = 0,312 \cdot 10^{-7} \cdot x^{3,58}$. Najwyższe współczynniki, przekraczające 0,500 kg P/ha/rok ustalono zarówno dla niektórych zlewni górskich i podgórskich jak i nizinnych, najniższe natomiast, poniżej 0,100 kg P/ha/rok zarówno dla zlewni podgórskich jak i nizinnych. Wartości współczynników jednostkowego odpływu substancji biogennej przedstawione w tabeli 1, zostały określone przy następujących wartościach jednostkowego odpływu wód: dla rzek górskich od 3723 do 19779 m³/ha/rok, dla rzek podgórskich od 654 do 3802 m³/ha/rok oraz dla rzek nizinnych od 393 do 2078 m³/ha/rok. Rozważania nad ustaleniem czynników warunkujących odpływ substancji biogennej, przeprowadzone w oparciu o zgromadzony materiał badawczy wykazały, że wielkość odpływającego ładunku tych substancji zależna jest przede wszystkim od warunków meteorologiczno-hydrologicznych. Wielkość ładunków związków biogennej, odpływających z analizowanych zlewni jest w znacznej mierze warunkowana natężeniem odpływu wód o czym świadczą między innymi wysokie współczynniki korelacji jakie otrzymano dla równań regresji, opisujących tę zależność.

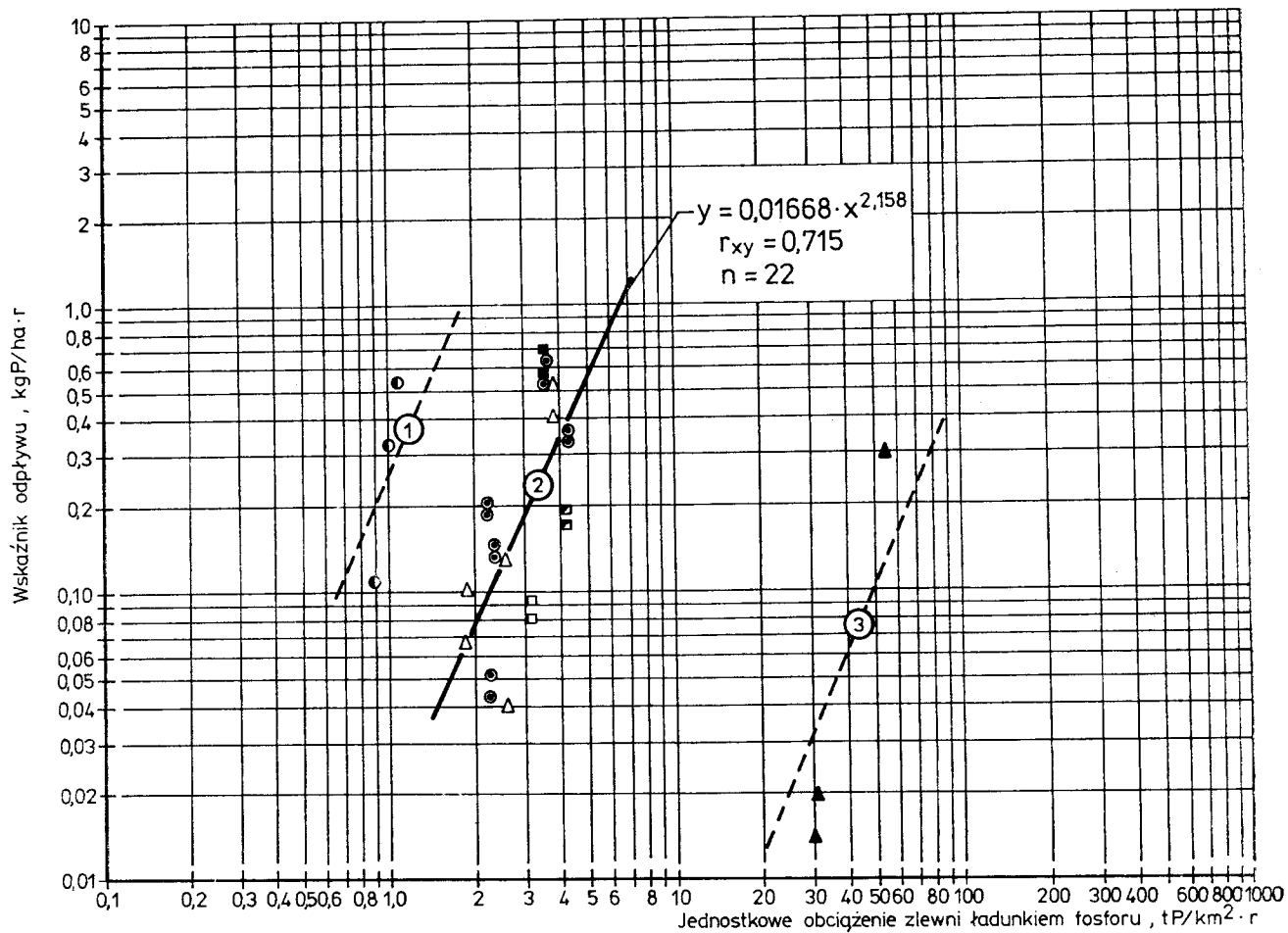
Roczne ładunki substancji biogennej, odpływające ze zlewni cząstkowych, objętych dwuletnim cyklem badawczym wykazują znaczne różnicowanie, przy czym stwierdzone różnice najwyraźniej korelują z wielkościami rocznego odpływu wód, wykazując zwiększenie odpływającego ładunku wraz ze wzrostem przepływu. Stwierdzono również, że średnie roczne stężenia substancji biogennej, w wodach odpływających utrzymywały się w rozpatrywanych latach na tym samym poziomie, niezależnie od wielkości odpływu wód. Prawie jednakowe wartości średnich rocznych stężeń przy wyższym ładunku rocznym, świadczą, że siła wypływająca substancje biogenne ze zlewni, jest jednym z głównych czynników wpływających na wielkość rocznego ich ładunku, odpływającego z obszaru danej zlewni, a tym samym decyduje ona również o wielkości współ-

czynników jednostkowego odpływu tych substancji. W świetle powyższego stwierdzenia wynika, że w zależności od charakterystyki hydrologicznej danego roku, można otrzymać znacznie różniące się współczynniki odpływu substancji biogennej z tych samych zlewni, przy nie zmienionym sposobie ich zagospodarowania. Fakt ten stwarza potrzebę określenia wielkości współczynników jednostkowego odpływu substancji charakterystycznych dla typowych lat hydrologicznych (suchego, przeciętnego i mokrego).

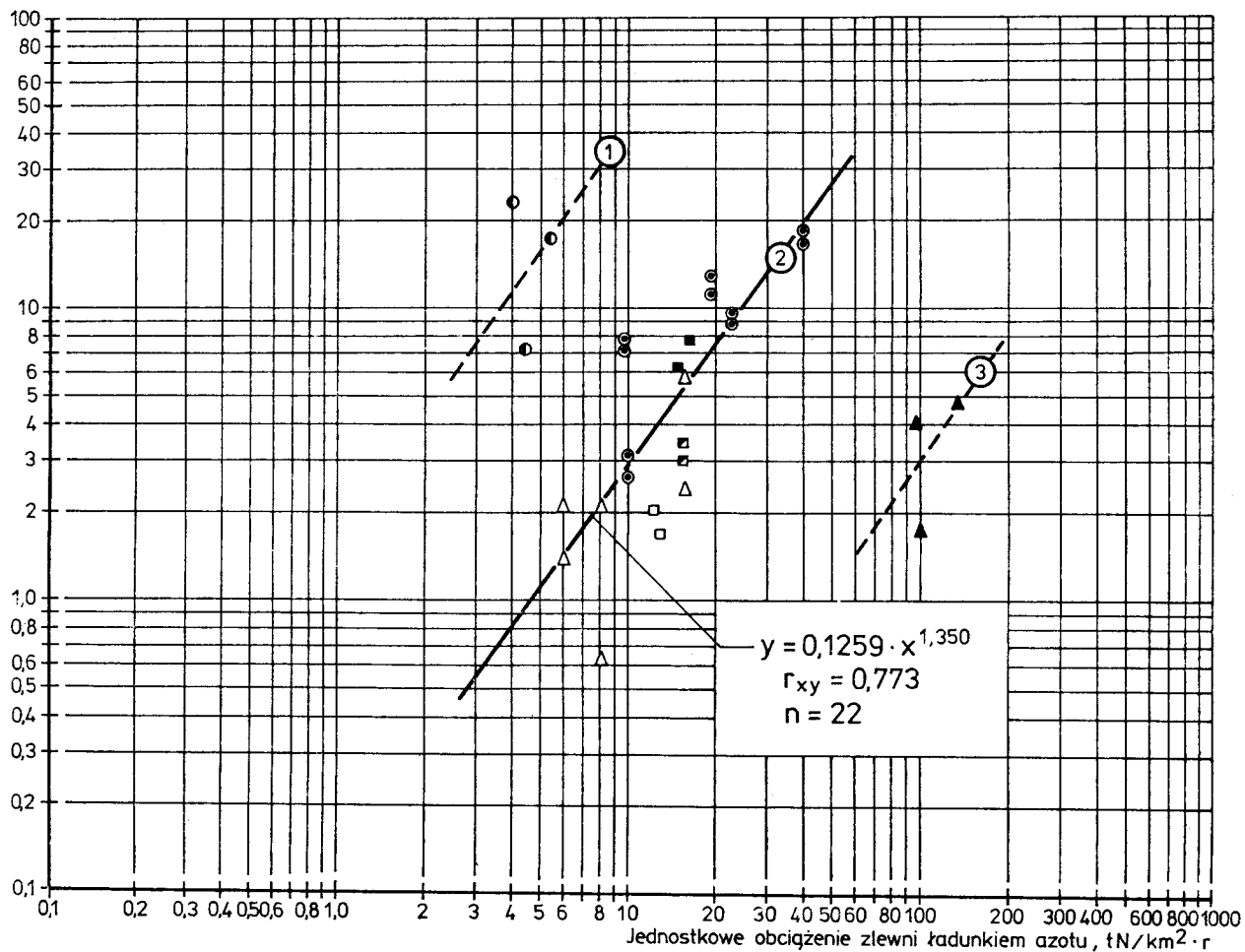
Poszukiwania zależności pomiędzy parametrami morfometrycznymi oraz wskaźnikami, charakteryzującymi stopień zagospodarowania zle-



Rys. 3 Zależność pomiędzy jednostkowym odpływem wód a wielkością współczynników odpływu fosforu i azotu dla górskich zlewni leśnych.



Rys. 4 Zależność pomiędzy współczynnikiem obciążenia zlewni a współczynnikiem odpływu z niej fosforu



Rys. 5 Zależność pomiędzy współczynnikiem obciążenia zlewni a współczynnikiem odpływu z niej azotu.

wni, wykazały wyraźną odrębność górskich zlewni leśnych. Zlewnie te, przy naturalnym obciążeniu, charakteryzują wartości współczynników odpływu substancji biogenych wyższe lub równe wartościom otrzymanym dla zlewni rolniczych. Zjawisko to należy przypisać w znacznej mierze ładunkom, pochodzącym z opadów atmosferycznych. Badania nad zawartością substancji biogenych w opadach przeprowadzone na terenie zlewni rzeki Kamiennej wykazały, że ilość ich wprowadzana na obszar zlewni wynosi dla fosforu ok. 2,1 kg/ha/r oraz dla azotu ok. 42,4 kg/ha/rok. W przypadku zlewni górskich pokrytych lasami, stwierdzono wyraźny wpływ warunków hydrologicznych na wielkość odpływu substancji biogenych. Dla tych zlewni otrzymano jednoznaczную zależność pomiędzy współczynnikiem odpływu wód wyrażonym w $\text{m}^3/\text{km}^2/\text{rok}$ a współczynnikiem odpływu substancji biogenych wyrażonym w $\text{kg}/\text{ha}/\text{rok}$. Zależności te przedstawia rys. 3.

Pomijając w dalszych rozważaniach wyniki badań górskich zlewni leśnych, otrzymano wyraźną zależność pomiędzy jednostkowym obciążeniem powierzchni zlewni ładunkiem fosforu i azotu a współczynnikiem odpływu tych substancji z badanych obszarów. W otrzymanym układzie punktów rys. 4 i 5 można wyodrębnić trzy zależności, tj. dla zlewni górskich, dla większości zlewni nizinnych użytkowanych rolniczo oraz dla zlewni nizinnych rzeki Samy. Analiza cech poszczególnych zlewni wykazała pomiędzy nimi wyraźne różnice w rodzaju podłoża i warunkach hydrogeologicznych, przy czym do każdej z wyodrębnionych grup wchodzi zlewnie o zbliżonych cechach podłoża. Można zatem przyjąć, że otrzymane układy punktów wyznaczają zależności charakterystyczne dla zlewni:

- 1 — o podłożu nieprzepuszczalnym
- 2 — średnio przepuszczalnym
- 3 — łatwo przepuszczalnym.

To samo zróżnicowanie na identyczne trzy grupy otrzymano dla jednoznacznie określonej zależności pomiędzy wielkościami (w t N i P na rok): ładunku powstającego i zużywanego w zlewni i ładunku z nich odpływającego. Zależności te, o bardzo wysokim poziomie istotności wykazują, że wartość odpływu fosforu i azotu z analizowanych zlewni zależne są również od wielkości globalnego ładunku zawartego na obszarze zlewni. W przypadku fosforu największe straty stwierdzono dla zlewni górskich od 1,2—3,7%. Dla zlewni podgórskich straty te wahają się od 0,2—1,7%, przy czym większość otrzymanych wyników oscyluje wokół wartości ok. 1%. Dla zlewni nizinnych straty fosforu zmieniają się w granicach od 0,005 do 1,6% z tym, że większość wyników nie przekracza 0,7%.

Wnioski

1. Badania przeprowadzone na 26 zlewniach, charakteryzujących się odmiennymi parametrami morfometrycznymi, zróżnicowanym rodzajem gleb, podłoża, sposobem użytkowania oraz

odmiennymi cechami indywidualnymi wykazały, że wielkość odpływu substancji biogenych z obszarów zlewni zależy przede wszystkim od warunków meteorologiczno-hydrologicznych, rodzaju podłoża oraz wielkości obciążenia zlewni.

2. Dla badanych zlewni nie stwierdzono korelacji pomiędzy procentowym udziałem użytków rolnych a stężeniem analizowanych substancji biogenych i ich współczynnikami odpływu w wodach, odpływających z ich obszaru.

3. Stwierdzono, że zarówno wielkość odpływającego ładunku rocznego jak i ładunku chwilowego fosforu i azotu w badanych ciekach jest funkcją przepływu i wzrasta wraz z jego przyrostem.

4. Przy zbliżonym charakterze podłoża istnieje zależność pomiędzy obciążeniem zlewni ładunkiem badanych substancji a wartością współczynników ich jednostkowego odpływu.

LITERATURA

1. P. J. DILLON, W. B. KIRCHNER 1975: The effects of geology and land use on the export of phosphorus from watersheds, *Water Research*, 9, 135—148.
2. H. FLORCZYK 1978: Określenie wielkości spływu substancji biogenych ze zlewni o różnej charakterystyce i sposobie zagospodarowania. IMGW. Wrocław, maszynopis.
3. H. FLORCZYK 1980: Współczynniki jednostkowego odpływu zanieczyszczeń obszarowych ze zlewni o różnej charakterystyce zagospodarowania. IMGW. Wrocław, maszynopis.
4. S. GOŁOWIN, H. FLORCZYK 1978: Wpływ chemizacji rolnictwa na stan czystości wód jeziorowych. Materiały na sesję naukową: Ochrona i kształtowanie środowiska na tle planów społecznego rozwoju oraz przestrzennego zagospodarowania w makroregionie pld.-zach. Komisja Planowania przy Radzie Min., PAN, UW w Legnicy, Legnica, 289—301.
5. S. GOŁOWIN, H. FLORCZYK 1979: Badania nad określeniem stopnia eutrofizacji i metod jej kontroli w zbiornikach wodnych. IMGW, Wrocław, maszynopis.
6. A. HAMM 1976: Zur Nährstoffbelastung von Gewässern aus diffusen Quellen: Flächenbezogene P-Abgaben — eine Ergebniss- und Literaturzusammenstellung. *Z. f. Wasser- und Abwasser-Forschung*, 9,1: 4—10.
7. R. KRASNODEBSKI, A. DĄBROWSKI 1978: Regresyjny model prognozy stanu zanieczyszczeń w rzece w ustalonym przekroju. IMGW, Wrocław, maszynopis.
8. M. LIEBMANN 1970: Biological and chemical investigations on the effect of sewage-pipelines on the eutrophication of Bavarian Lakes 5-th Int. Water Poll. Res. Conf., San Francisco, III—22.
9. R. A. VOLLENWEIDER 1968: Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication. OECD, Directorate for Scientific Affairs. Paris.
10. R. A. VOLLENWEIDER, P. J. DILLON 1974: The application of the phosphorus loading concept to eutrophication research. Canada Centre for Inland Waters Environment Canada, Burlington; Ontario, 42.
11. M. ZIEBA 1979: Program AREQ w języku FORTRAM 1900 do prognozy stanu zanieczyszczenia wód w danym przekroju rzeki. IMGW, Wrocław, maszynopis.