

Z badań nad modelowaniem i prognozowaniem wskaźników zanieczyszczenia Odry

Wstęp

Potrzeba racjonalnego korzystania z zasobów środowiska przyrodniczego, realizacja zrównoważonego rozwoju wymaga sprawnego, efektywnego systemu obserwacji środowiska z wykorzystaniem technologii informatycznych i metod matematycznych. Wydaje się że w funkcjonującym w Polsce Państwowym Monitoringu Środowiska wskazane jest szersze wykorzystanie metod matematycznych do sporządzania ocen i prognoz stanu środowiska (Orylska 1995; Orylska i Siemianowski 1994; Siemianowski 1997).

Celem referatu jest próba przedstawienia rezultatów modelowania i prognozowania wskaźników zanieczyszczenia Odry metodami matematycznymi.

Metodyka i materiał empiryczny

W referacie przedstawiono zastosowanie metod matematycznych do modelowania trendu i prognozowania jakości wody Odry z analizą sezonowości oraz współzależności.

Dane empiryczne dla celów badawczych udostępnił Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska w Szczecinie.

Badaniu poddano wybrane, istotne parametry, jak: temperatura wody, odczyn pH, biologiczne zapotrzebowanie tlenu (pięciodniowe) – BZT₅, chemiczne zapotrzebowanie tlenu – ChZT, stężenie tlenu rozpuszczonego, fosforanów, azotu ogólnego, chlorofil „a” oraz przepływ wody. Dla celów analizy obliczono średnie miesięczne. Modelowanie dynamiki i wahań przeprowadzono z zastosowaniem modeli trendu i współzależności z wahaniami sezonowymi.

Charakterystyka zanieczyszczeń wód płynących

Składnikami wód płynących obok substancji naturalnych skorupy ziemskiej (np. jony wapniowe, sodowe, magnezowe, siarczanowe, chlorkowe i inne) są różnego rodzaju zanieczyszczenia pochodzenia przyrodniczego oraz antropogenicznego. Zanieczyszczenie, a zarazem jakość wód opisywane są wieloma wskaźnikami fizykochemicznymi i biologicznymi.

Temperatura wywiera duży wpływ na biocenozę wód i zachodzące w nich procesy chemiczne. Poszczególne organizmy wodne cechuje określony zakres temperatur dla życia i rozwoju. Przekroczenie limitów może być szkodliwe. Nagła zmiana temperatury może również być śmiertelna, mimo nieprzekroczenia granicy letalnej. Wysoka temperatura przyspiesza przebieg procesów chemicznych i biochemicznych w wodzie, np. procesu nityfikacji. Wzrost temperatury zmniejsza rozpuszczalność tlenu w wodzie, co może doprowadzić do deficytu tlenowego i spadku zdolności asymilacyjnej odbiornika (rzeki), tj. zmniejszenia ładunku ścieków możliwego do przyjęcia, oraz zwiększenia wrażliwości organizmów wodnych na działanie toksykantów.

Odczyn pH określa stopień zakwaszenia lub zasadowości. Odczyn wód naturalnych zależy od rodzaju podłoża i gleb w zlewni oraz od zanieczyszczeń (ścieki, opady atmosferyczne, sploty powierzchniowe). Wody powierzchniowe mają pH zwykle w przedziale 6,5–8,5. Znaczny wpływ na zakwaszenie wód powierzchniowych mają tzw. kwaśne deszcze będące wynikiem spalania węgla i ropy naftowej. Wiele gatunków ryb ginie już przy $\text{pH} = 5,5$. Zarówno wody zbyt kwaśne, jak i zbyt alkaliczne są szkodliwe. Szczególnie wody kwaśne mają niekorzystne działanie, powodują przyspieszoną korozję metali oraz wymywanie metali ciężkich i radionuklidów z osadów dennych.

Tlen rozpuszczony w wodzie ma podstawowe znaczenie dla wszelkich procesów zachodzących w wodach naturalnych, jest niezbędny do życia ryb i innych organizmów, jest zużywany przy rozkładzie substancji organicznych umożliwiając samooczyszczanie wód. Rozpuszczalność tlenu w wodzie maleje ze wzrostem temperatury i zasolenia. Niedotlenienie może wystąpić przy zbyt szybkim zużywaniu tlenu (np. z powodu nadmiernego zanieczyszczenia ściekami). Deficyt tlenowy (szczególnie duży to 30-procentowe nasycenie tlenem lub 2–3 mg tlenu na dm^3) powoduje śnięcie ryb, mogą powstać warunki beztlenowe (anaerobowe), objawiające się nieprzyjemnym odorem (powstaje siarkowodór).

Związki azotu dostają się wraz ze ściekami miejskimi i przemysłowymi, spływami powierzchniowymi i opadami atmosferycznymi. Duży udział zanieczyszczenia wód powierzchniowych azotem pochodzi od nie zawsze właściwego stosowania związków azotowych w rolnictwie (zbyt duże dawki nawozów).

Fosfor w wodach powierzchniowych występuje z przyczyn naturalnych: w wyniku wietrzenia i rozpuszczania minerałów fosforanowych, erozji gleby oraz w wyniku dopływu ścieków komunalnych i przemysłowych, spływów powierzchniowych i opadów atmosferycznych. W ściekach bytowych znajdują się znaczne ilości fosforanów ze środków piorących zawierających te związki. Biogenne związki azotu i fosforu intensyfikują rozwój fitoplanktonu (glonów).

Zanieczyszczenie wody związkami organicznymi jest określane za pomocą takich wskaźników, jak: BZT₅ – pięciodniowe biochemiczne zapotrzebowanie tlenu, utlenialność – ChZT(Mn), chemiczne zapotrzebowanie tlenu metodą manganową, oraz chemiczne zapotrzebowanie tlenu metodą chromianową – ChZT(Cr). Wymienione cechy obrazują zużywanie tlenu. Związki organiczne dostają się do wód ze ściekami przemysłowymi i komunalnymi (węglowodory, fenole). Pochodzą również ze spływów powierzchniowych z pól (chemikalia rolnicze – pestycydy), z opadów atmosferycznych oraz ze źródeł naturalnych. Duże stężenia związków organicznych są szkodliwe dla organizmów, pogarszają smak i zapach wody.

Chlorofil „a” – jeden z zielonych barwników roślin (odpowiedzialny za asymilację dwutlenku węgla w fotosyntezie), jest wskaźnikiem zawartości biomasy (fitoplanktonu) w wodzie i intensywności fotosyntezy.

Stężenie związków w wodzie związane jest również z przepływem wody. Wszystkie wskaźniki wykazują wahania sezonowe.

W Polsce wody rzeczne klasyfikowane są według czterostopniowej skali. Wody klasy I to wody nie zanieczyszczone, nadające się jako źródła wody pitnej. Wody klasy II nadają się do hodowli ryb i rekreacji, wody klasy III mogą być wykorzystane do celów przemysłowych i nawodnień rolniczych. Wody pozaklasowe (nie odpowiadające normatywom – n.o.n.) oznaczają wody nie nadające się do wykorzystania użytkowego. Normy wskaźników przedstawia tabela 1.

Tabela 1

Normy wybranych wskaźników klasyfikujące wodę do danej klasy

Cecha	Jednostka	Klasa I		Klasa II		Klasa III		n.o.n.
		od	do	od	do	od	do	
Temperatura wody	°C	pon. 22	22	22	26	pon. 26	26	pow. 26
Odczyn	pH	6,5	8,5	8,5	9	6	6,5	pon. 6 i pow. 9
Tlen rozpuszczony	mg O ₂ /dm ³	pow. 6	6	6	5	5	4	pon. 4
BZT ₅	mg O ₂ /dm ³	0	4	4,0	8	8	12	pow. 12
ChZT-Mn	mg O ₂ /dm ³	0	10	10	20	20	30	pow. 30
Azot ogólny	mg N/dm ³	0	5	5	10	10	15	pow. 15
Fosforany	mg PO ₄ /dm ³	0	0,2	0,2	0,6	0,6	1	pow. 1
Chlorofil „a”	g/dm ³	0	10	10	20	20	30	pow. 30

Źródło: Opracowanie na podstawie Rozp. MOŚZNiL z 5 XI 1991, Dz. U. 116, poz. 503 z 1991 r.

Prognozowanie i modelowanie wskaźników jakości wody

Przedstawiono rezultaty zastosowania metod ekonometrycznych do modelowania dynamiki i wahań oraz prognozowania wskaźników zanieczyszczenia wód Odry (Zawadzki 1995; Raport o stanie... 1995).

Analizowano wybrane ważne wskaźniki jakości wody Odry, między innymi: odczyn pH, chlorofil „a”, substancje biogenne.

Parametry równań modeli szeregu czasowego opisujących badane zmienne szacowano na podstawie 48 obserwacji średnich miesięcznych z okresu listopad 1990 – październik 1994.

Prognozy zostały wyznaczone dla okresu listopad 1994 – październik 1995. Oceny współczynników determinacji R² wskazywały na dobre dopasowanie wartości teoretycznych do empirycznych (przykładowo dla chlorofilu „a” R² = 0,92; dla fosforanów – 0,73, odczynu pH – 0,77).

Zastosowano model trendu ze stałą sezonowością o postaci:

$$Y_t = \alpha_1 t + \alpha_0 + \sum_{k=1}^m d_k Q_{kt} + U_t \quad (1)$$

gdzie:

Y_t – zmienna objaśniana,

Q_{kt} – macierz zerojedynkowa przyjmująca wartości 1 w k-tym sezonie i wartość zero w pozostałych sezonach,

α_0, α_1 – parametry trendu,

d_k – parametry opisujące wahania sezonowe, k – indeks sezonów,

t – zmienna czasowa, U_t – składnik losowy.

Wykresy przedstawiają przebieg wartości wyznaczonych prognoz na tle wartości empirycznych (rys. 1–11). Współczynniki determinacji i błędy względne prognoz zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Względne i przeciętne błędy prognoz badanych cech jakości wody Odry oraz wartości współczynnika determinacji R^2

t	Miesiąc, rok	Przepływ	Temperatura wody	Odczyn pH	Tlen rozpuszczony	BZT ₅	ChZT (Mn)	Azot ogólny	Fosforany	Chlorofil „a”
49	Lis-94	0,11	0,39	0,003	0,05	0,03	0,03	0,17	0,25	0,86
50	Gru-94	0,17	0,66	0,02	0,06	0,32	0,01	0,18	0,02	0,42
51	Sty-95	0,28	0,46	0,02	0,10	0,25	0,09	0,06	0,08	0,67
52	Lut-95	0,16	1,15	0,01	0,01	0,20	0,002	0,21	0,18	0,84
53	Mar-95	0,12	0,17	0,03	0,05	0,11	0,03	0,09	0,44	1,30
54	Kwi-95	0,32	0,19	0,03	0,03	0,17	0,02	0,18	0,24	0,80
55	Maj-95	0,08	0,09	0,001	0,02	0,004	0,02	0,01	0,15	0,27
56	Cze-95	0,37	0,09	0,09	0,29	0,55	0,27	0,00	0,88	0,44
57	Lip-95	0,20	0,08	0,04	0,10	0,20	0,15	0,03	0,28	0,04
58	Sie-95	0,23	0,07	0,03	0,005	0,16	0,03	0,14	0,11	0,59
59	Wrz-95	0,18	0,09	0,04	0,15	0,27	0,13	0,21	0,13	0,11
60	Paź-95	0,24	0,23	0,03	0,19	0,39	0,13	0,05	0,21	0,26
Przeciętny błąd względny		0,20	0,31	0,03	0,09	0,22	0,08	0,26	0,25	0,19
R^2		0,57	0,93	0,77	0,24	0,64	0,74	0,75	0,73	0,92

Źródło: Opracowanie własne.

Parametry fizykochemiczne wody podlegają również wzajemnym współzależnościom (tab. 3). Przykładowo, wzrost temperatury, duży przepływ wody, wzrost zawartości fosforu i zakwit glonów (chlorofil) powodują wzrost zużycia tlenu obrazowanych przez BZT₅ i ChZT.

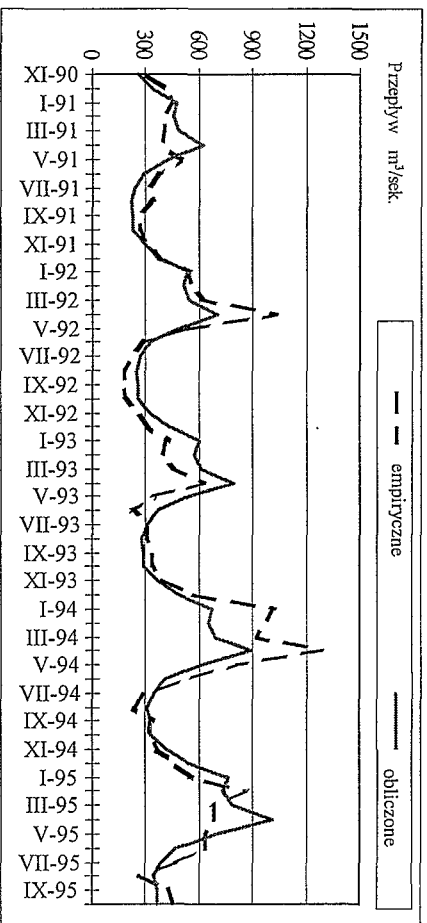
Silną dodatnią korelację (tab. 3) wykazują między innymi: temperatura wody z BZT₅ i ChZT, odczyn pH z BZT₅ i ChZT, chlorofil „a” z BZT₅ i ChZT.

Tabela 3

Współczynniki korelacji badanych wskaźników jakości wody dla średnich miesięcznych z okresu listopad 1990 – październik 1995 w punkcie pomiarowo-kontrolnym na Odrze w Krajniku Dolnym

	Przepływ	Temperatura wody	Odczyn pH	Tlen rozpuszczony	BZT ₅	ChZT (Mn)	Azot ogólny	Fosforany	Chlorofil „a”
Przepływ	1,000	-0,331	-0,385	0,265	-0,560	-0,349	0,634	-0,481	-0,521
Temperatura wody	-0,331	1,000	0,793	-0,451	0,675	0,819	-0,740	-0,393	0,752
Odczyn pH	-0,385	0,793	1,000	-0,090	0,832	0,878	-0,550	-0,333	0,880
Tlen rozpuszczony	0,265	-0,451	-0,090	1,000	-0,152	-0,240	0,484	-0,307	-0,105
BZT ₅	-0,560	0,675	0,832	-0,152	1,000	0,816	-0,501	-0,059	0,840
ChZT (Mn)	-0,349	0,819	0,878	-0,240	0,816	1,000	-0,541	-0,301	0,891
Azot ogólny	0,634	-0,740	-0,550	0,484	-0,501	-0,541	1,000	0,022	-0,561
Fosforany	-0,481	-0,393	-0,333	-0,307	-0,059	-0,301	0,022	1,000	-0,207
Chlorofil „a”	-0,521	0,752	0,880	-0,105	0,840	0,891	-0,561	-0,207	1,000

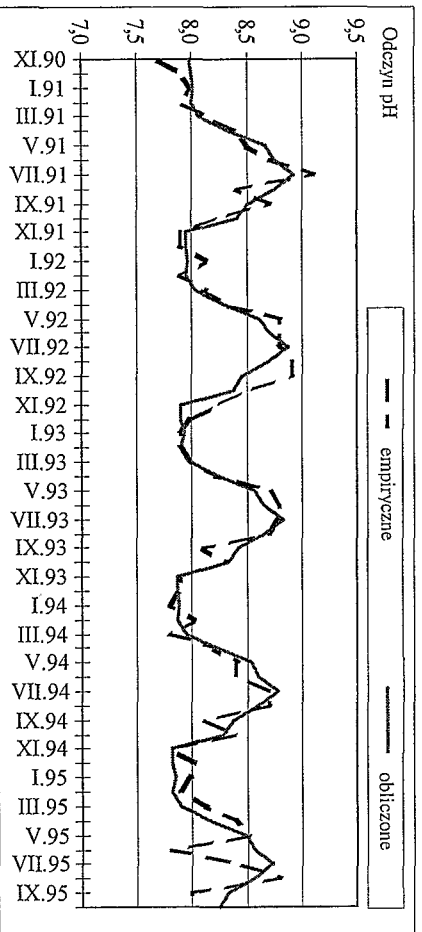
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 1

Wartości empiryczne i prognozowane przepływu wody Odry w Krajniku

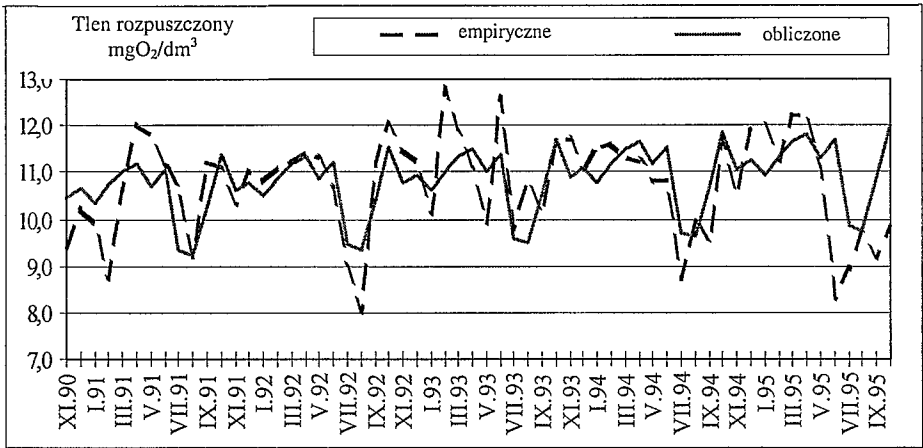
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 2

Wartości empiryczne i prognozowane odczynu pH wody Odry w Krajniku

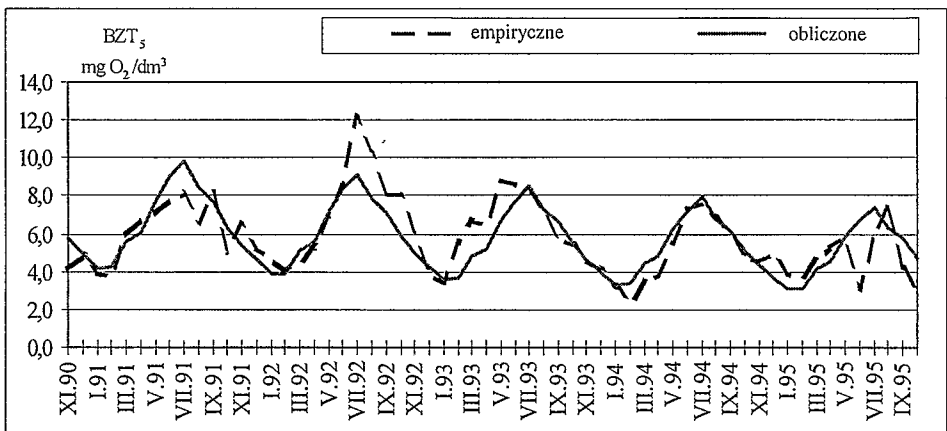
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 3

Wartości empiryczne i prognozowane tlenu rozpuszczonego wody Odry w Krajniku

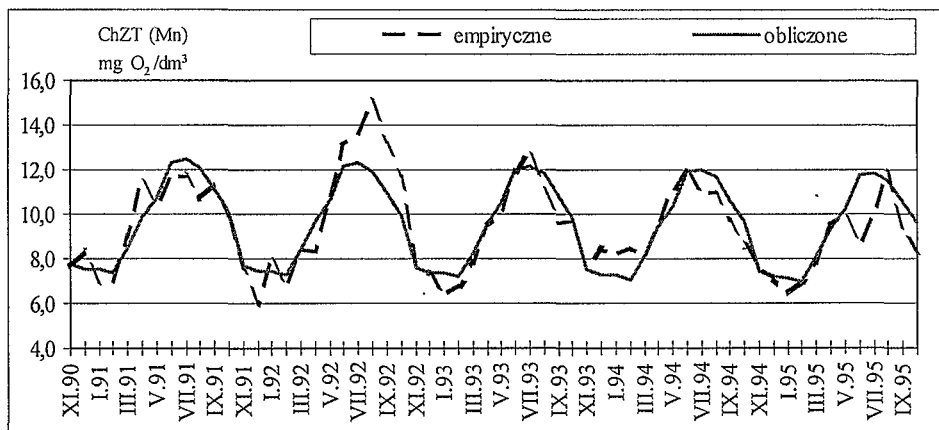
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 4

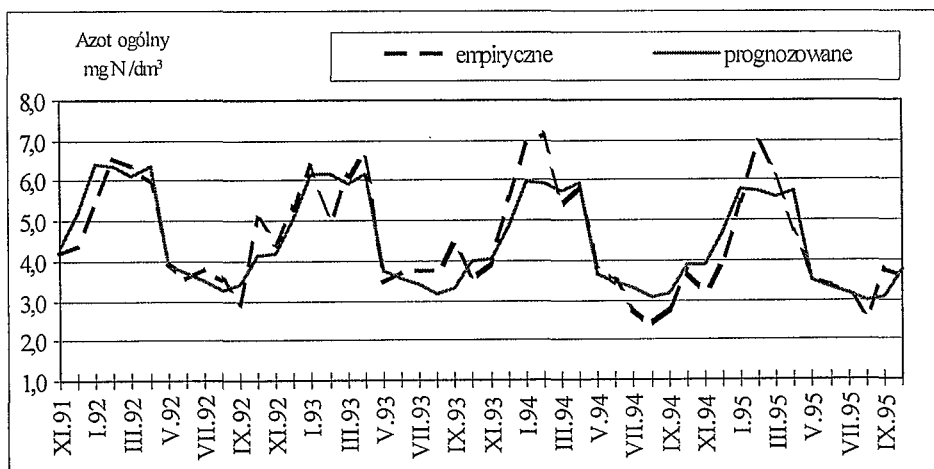
Wartości empiryczne i prognozowane BZT₅ wody Odry w Krajniku

Źródło: Opracowanie własne.

**Rysunek 5**

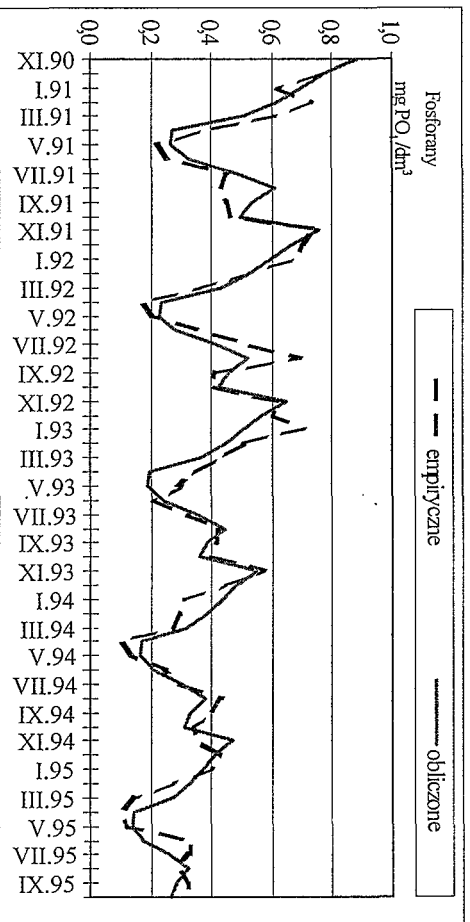
Wartości empiryczne i prognozowane ChZT(Mn) wody Odry w Krajniku

Źródło: Opracowanie własne.

**Rysunek 6**

Wartości empiryczne i prognozowane azotu ogólnego w wodzie Odry w Krajniku

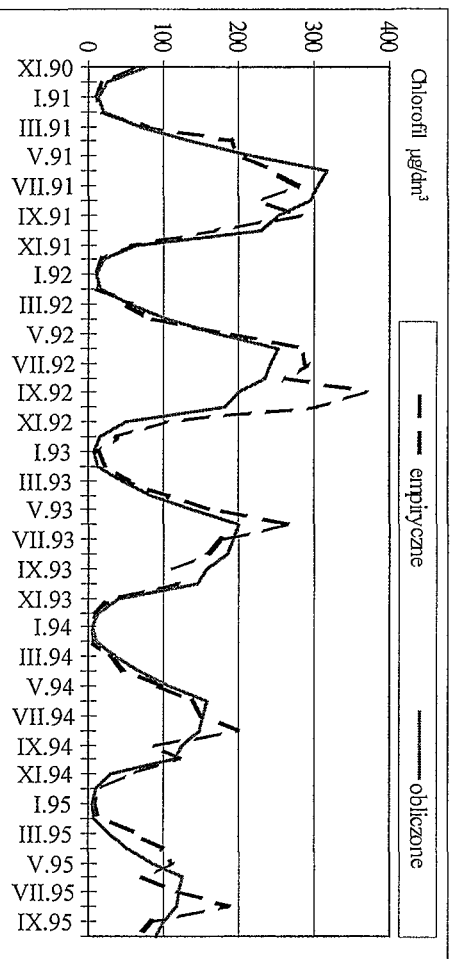
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 7

Wartości empiryczne i prognozowane fosforanów w wodzie Odry w Krajiniku

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 8

Wartości empiryczne i prognozowane chlorofilu „a” w wodzie Odry w Krajiniku

Źródło: Opracowanie własne.

Celem uzyskania pełniejszego obrazu kształtowania się badanych cech jakości wody zastosowano ponadto poniższy model współzależności (II):

$$Y_t = \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i X_{it} + \sum_{k=1}^m d_{0k} Q_{kt} \quad (\text{II}),$$

w którym wprowadzono zmienne objaśniające – X_i .

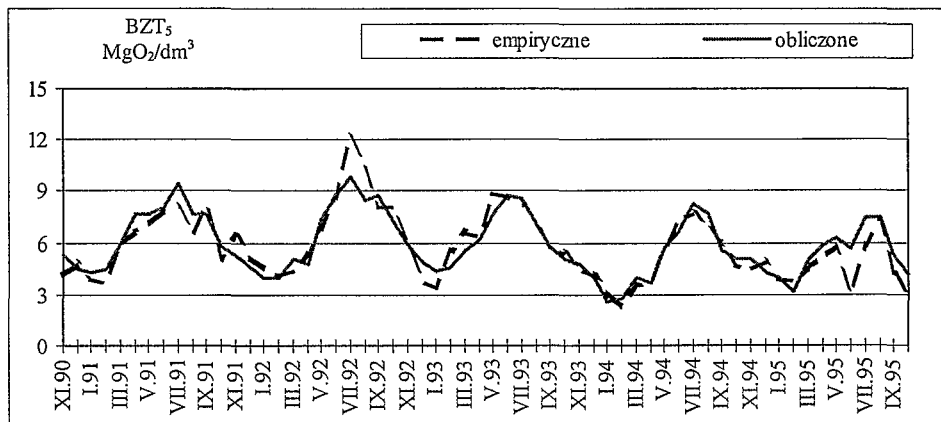
Wyznaczono prognozy zużycia tlenu. Zmienną endogeniczną modelu stanowiło biochemiczne zapotrzebowanie tlenu – BZT₅. Przeanalizowano trzy warianty modelu (II), wykorzystując jako zmienne egzogeniczne poniższe cechy:

- przepływ i chlorofil „a”,
- przepływ i temperatura wody,
- przepływ i odczyn pH.

Otrzymane wyniki zilustrowano na wykresach (rys. 9–11).

Najlepsze wyjaśnienie zmienności BZT₅ uzyskano dla zmiennych objaśniających: przepływ i odczyn pH (model c, $R^2 = 0,79$). Pozostałe dwa warianty modelu również cechują się dobrym dopasowaniem (model a, $R^2 = 0,71$ i model b, $R^2 = 0,75$).

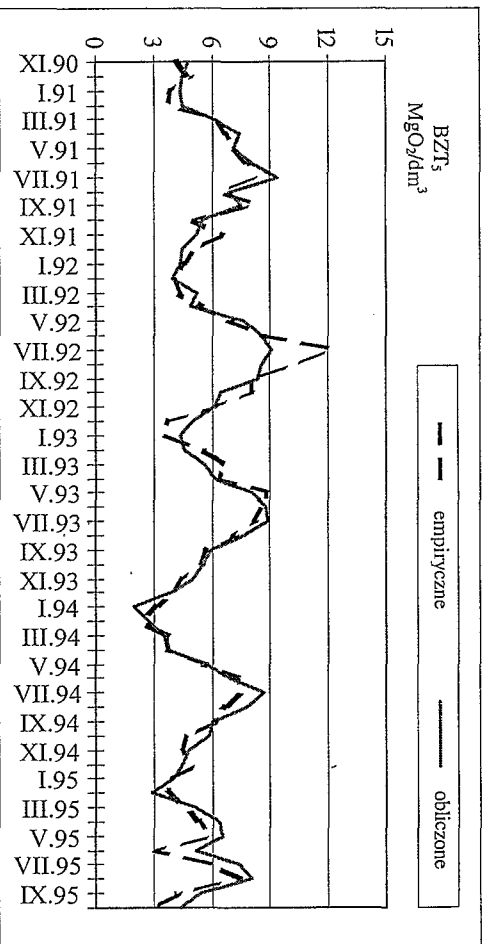
W tabeli 4 przedstawiono obliczone błędy względne prognoz i współczynniki determinacji modelu II.



Rysunek 9

Wartości BZT₅ w zależności od przepływu i chlorofilu „a” (model a)

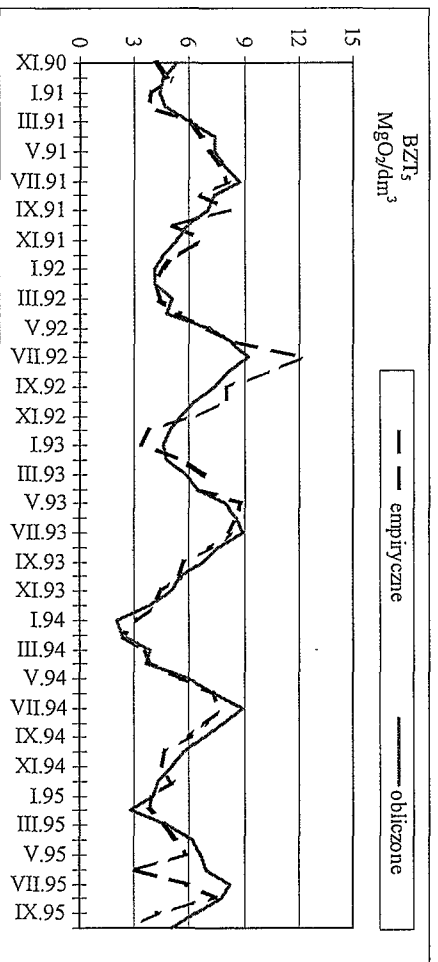
Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 10

Wartości BZT₅ w zależności od przepływu i odczynu pH (model b)

Źródło: Opracowanie własne.



Rysunek 11

Wartości BZT₅ w zależności od przepływu i temperatury wody (model c)

Źródło: Opracowanie własne.

Tabela 4

Błędy względne prognoz i współczynniki determinacji modeli współzależności (II) cech jakości wody Odry w Krajniku Dolnym

Miesiąc, rok	Model a	Model b	Model c
Listopad 94	0,135	0,015	0,041
Grudzień 94	0,121	0,004	0,050
Styczeń 95	0,007	0,025	0,014
Luty 95	0,164	0,122	0,062
Marzec 95	0,089	0,044	0,058
Kwiecień 95	0,103	0,055	0,025
Maj 95	0,084	0,058	0,021
Czerwiec 95	0,886	0,218	0,249
Lipiec 95	0,256	0,111	0,104
Sierpień 95	0,019	0,034	0,037
Wrzesień 95	0,262	0,191	0,138
Październik 95	0,454	0,188	0,120
Średnie	0,215	0,089	0,077
R ²	0,71	0,75	0,79

Źródło: Opracowanie własne.

Wnioski

W niniejszym referacie wykazano przydatność metod ekonometrycznych w modelowaniu i prognozowaniu cech jakości wody. Przedstawiona procedura umożliwia przeanalizowanie kształtowania się kolejnych wskaźników w monitoringu Odry, wód Zalewu Szczecińskiego lub kolejnych rzek. Proponowane metody powinny znaleźć szersze zastosowanie w przygotowywaniu ocen i prognoz stanu środowiska w Państwowym Monitoringu Środowiska.

Literatura

1. ORYLSKA J. (red.), 1995: *Zastosowania informatyki w gospodarce – systemy informatyczne ochrony środowiska*, Akademia Rolnicza, Szczecin.
2. ORYLSKA J., SIEMIANOWSKI L., 1994: Wybrane systemy informatyczne w ochronie środowiska naturalnego. Materiały konferencyjne *Do-*

- radztwo w ekorozwoju obszarów wiejskich*, AR Szczecin – ART Olsztyn, Szczecin.
3. SIEMIANOWSKI L., 1997: Problemy obserwacji i prognozowania zanieczyszczenia terenów Odry z wykorzystaniem technologii informatycznych – rozprawa doktorska, Uniwersytet Szczeciński.
 4. ZAWADZKI J., 1995: *Ekonometryczne metody prognozowania procesów gospodarczych*, Akademia Rolnicza, Szczecin.
 5. *Raport o stanie środowiska w województwie szczecińskim*, Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska, Szczecin, 1995, praca zbiorowa p. red. T. Mutko.
 6. Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z 5 XI 1991, Dz. U. 116, poz. 503 z 1991 r.

Application of selected methods for modelling and predicting the water quality parameters of Odra river

Abstract

This paper is an presenting of the trial of application the selected mathematical methods for modelling and predicting the water quality parametres of Odra river with analysis of seasonality and regression. The main following parameters ware modelled: water temperature, concentration of dissolved oxygen, biochemical oxygen demand – BOD5, chemical oxygen demand, concentrations of phosphates and nitrates, chlorophyll „a” and water flow. The monthly averages (of five hydrological years range) of mentioned parameters were calculated for analysing. Modelling and estimating the predictions of the water quality parameters of Odra river were performed with using the trend and regression model with seasonality analysis. The results point the asability of presented method at predicting the water quality parameters.

It seems that mathematical methods should be more often applied in Polish State Environment Monitoring to prepare reports and assesments.