



Wykorzystanie wielowymiarowych metod statystycznych w analizie stanu fizykochemicznego wód w systemie rzeka – zbiornik retencyjny na przykładzie zbiorników retencyjnych Pakosław i Jutrosin położonych w zlewni rzeki Orli

Czesław Przybyła^{}, Piotr Kozdrój^{**}, Mariusz Sojka^{*}*

^{}Uniwersytet Przyrodniczy, Poznań*

*^{**}Wielkopolski Zarząd Melioracji i Urządzeń Wodnych, Poznań,
Rejonowy Oddział, Leszno*

1. Wstęp

Realizowany w Polsce od 1995 program małej retencji wiązał się między innymi z budową małych zbiorników retencyjnych. Główny nacisk w początkowej fazie programu ukierunkowany był na ilość gromadzonej w zbiornikach wody. Z upływem czasu zaczęto zwracać uwagę na stan fizykochemiczny wód retencjonowanych w zbiornikach, który może powodować utrudnienia w ich wykorzystaniu. W wielu przypadkach jakość wody ogranicza jej społeczne, gospodarcze i rekreacyjne wykorzystanie. Zła jakość wód przynosi negatywne skutki ekologiczne, jest zagrożeniem dla zdrowia człowieka, ale również ma poważne konsekwencje ekonomiczne rosną bowiem koszty jej uzdatniania.

Piętrzenie rzek oraz budowa zbiorników retencyjnych w istotny sposób wpływa na procesy fizyczne, chemiczne, biologiczne i biochemiczne zachodzące w wodzie [6]. W wyniku piętrzenia zwiększa się powierzchnia lustra wody i głębokość, wydłuża się czas przepływu wody natomiast znacznie zmniejsza się prędkość przepływu wody [7]. W rzekach, na których istnieją liczne budowle hydrotechniczne jazy, zastawki, sztuczne zbiorniki retencyjne proces samooczyszczania prze-

biega inaczej niż w ciekach swobodnie płynących. W celu zapewnienia w zbiornikach odpowiedniej jakości wody oraz zapewnienia walorów użytkowych należy prowadzić monitoring ich stanu [8]. Wyniki monitoringu pozwalają na identyfikację istotnych problemów na terenie zlewni, a także stanowią podstawę do podejmowania działań zmierzających do ograniczenia dopływu zanieczyszczeń [13]. Ocena jakości wód prowadzona jest od początku lat sześćdziesiątych XX wieku przez Wojewódzkie Inspektoraty Ochrony Środowiska (WIOS). Badania te, choć prowadzone na szeroką skalę nie uwzględniają małych rzek, na których planowane są najczęściej inwestycje z zakresu „małej retencji”. Dlatego bardzo ważne znaczenie mają badania prowadzone przez ośrodki naukowe w całym kraju, szczególnie monitoring jakości wód dopływających i odpływających ze zbiorników. Realizowane badania dostarczają informacji niezbędnych do podejmowania właściwych decyzji gospodarczych, związanych z użytkowaniem retencionowanych wód i ich ochroną [29–33]. Pomiar wykonywane w ramach monitoringu są podstawą do opisu zjawisk zachodzących w skali czasu i przestrzeni, jak również kalibracji i weryfikacji modeli prognostycznych. Wyniki monitoringu dostarczają dużej ilości danych, które są trudne do analizy i jednoznacznej interpretacji. Coraz częściej do analizy dużych zbiorów wykorzystywane są wielowymiarowe statystyczne metody analizy danych takie jak analiza skupień (CA), analiza składowych głównych (PCA), analiza czynnikowa (FA) oraz analiza dyskryminacyjna (DA) [1, 4]. W literaturze można znaleźć wiele przykładów zastosowań wielowymiarowych metod statystycznych do interpretacji wyników analiz fizykochemicznych wód: opadowych [2], gruntowych [11] i powierzchniowych [3, 10, 17–19, 21–25, 34], a także ścieków [20]. Wielowymiarowe metody statystyczne znajdują też zastosowanie przy ocenie jakości wód w zbiornikach retencyjnych [1, 14, 16, 27, 28, 33, 35] oraz osadów dennych [26].

Wielowymiarowe metody statystyczne są wykorzystywane do analizy danych pochodzących z monitoringu środowiska, pozwalają na optymalizację sieci monitoringu wód w odniesieniu do liczby profili pomiarowo-kontrolnych i ilości oznaczanych parametrów jakości wody. Metody te pozwalają na przemyślaną reorganizację istniejącej i rozbudowywanej sieci monitoringu wód powierzchniowych w Polsce. Poprzez ich zastosowanie możliwe jest wskazanie punktów pomiarowo-kontrolnych, które w sposób reprezentatywny opisują stan fizykochemiczny wód. Uzyskane wyniki wskazują, że możliwe jest zmniejszenie liczby

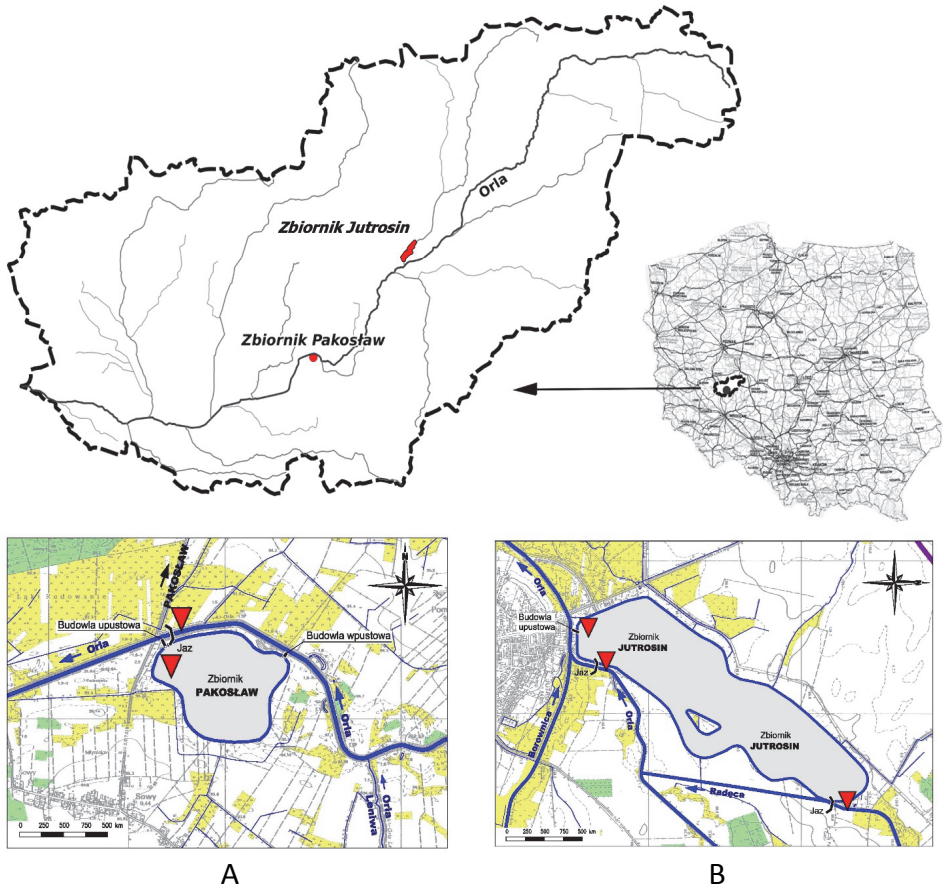
lub częstotliwości oznaczeń parametrów jakości wody o takie, które charakteryzują się małą zmiennością czasową i przestrzenną. Właściwe podejście do reorganizacji sieci monitoringu wód pozwoli na redukcję kosztów prowadzonych badań monitorujących bez obniżania jakości uzyskanych wyników.

Celem pracy było wykorzystanie wielowymiarowych metod statystycznych analizy danych do szczegółowej oceny stanu fizykochemicznego wód retencjonowanych w lateralnych zbiornikach Pakosław i Jutrosin na tle jakości wód rzek Orli i Radęcy. Do oceny podobieństw i różnic w składzie fizykochemicznym wód, identyfikacji reprezentatywnych wskaźników jakości wody do charakterystyki ich zmienności, ekspozycji ukrytych czynników objaśniających wewnętrzną strukturę danych oraz oceny wpływu naturalnych i antropogenicznych źródeł zanieczyszczeń na stan fizykochemiczny wód zastosowano wielowymiarowe statystyczne metody analizy danych, tj. analizę skupień (CA), analizę składowych głównych (PCA), analizę czynnikową (FA) oraz analizę dyskryminacyjną (DA).

2. Materiał i metody badań

Analizę stanu fizykochemicznego wód rzek Orli i Radęcy oraz ich wpływu na stan wód w lateralnych zbiornikach retencyjnych Pakosław i Jutrosin dokonano na podstawie własnych pomiarów prowadzonych w okresie od czerwca 2010 r. do października 2013 r. Pomiarów obejmowały okresowy pobór prób wód z rzek Orli i Radęcy, a także z obu zbiorników z częstotliwością (3–4 razy w roku). Łącznie pobrano 20 prób wody. Próby pobierano powyżej jazów piętrzących wodę umożliwiających napełnianie zbiorników retencyjnych Pakosław i Jutrosin (rys. 1).

Analizy laboratoryjne próbek wody obejmowały oznaczenia 14 wskaźników charakteryzujących: warunki tlenowe (tlen rozpuszczony i BZT₅), zasolenie (przewodność, siarczany, chlorki, wapń, magnez i twardość ogólną), zakwaszenie (odczyn) oraz zawartość związków biogennych (azot amonowy, azotynowy i azotanowy oraz fosforany). Analizy fizykochemiczne zostały wykonane w laboratorium Instytutu Melioracji, Kształtowania Środowiska i Geodezji (IMKŚiG) Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu zgodnie z obowiązującymi normami.



Rys. 1. Położenie obiektu badań – zbiornik Pakosław (A) i Jutrosin (B)
Fig. 1. Study site location – Pakosław (A) and Jutrosin (B) off-channel reservoir

Przed rozpoczęciem analizy zabrane dane zostały poddane szczegółowej weryfikacji statystycznej. W celu wyeliminowania błędów powstałych podczas analiz laboratoryjnych i wprowadzania danych do arkusza kalkulacyjnego oraz wykrycia obserwacji odstających zastosowano test kwartyłowy [5]. Następnie, w przypadku wyników oznaczeń azotu amonowego, azotynowego i azotanowego oraz fosforanów, które były poniżej progu oznaczalności zastosowanych metod analitycznych do dalszych obliczeń przyjęto połowę wartości progu oznaczalności. W kolejnym etapie sprawdzono zgodność rozkładu badanych parametrów jakości

wody z rozkładem normalnym na poziomie istotności $p_{\alpha}=0,05$ przy pomocy testu W (Shapiro-Wilka). Przeprowadzone analizy wykazały, że przewodność, odczyn, twardość ogólna, chlorki, wapń, tlen rozpuszczony oraz wartości BZT₅ miały rozkłady zbliżone do rozkładu normalnego. Wartości pozostałych wskaźników poddano normalizacji przy zastosowaniu następujących funkcji transformujących: $\log_{10}(x)$, $x^{0,25}$ i $x^{0,125}$ [12]. Przygotowany w ten sposób zbiór danych poddano skalowaniu przedziałowemu [12], a następnie analizie przy wykorzystaniu czterech wielowymiarowych metod statystycznych tj.: analizy skupień (CA), analizy składowych głównych (PCA), analizy czynnikowej (FA) i analizy dyskryminacyjnej (DA). Analizę skupień (CA) wykonano metodą Warda w celu zobrazowania podobieństw i różnic pomiędzy stanem fizykochemicznym wód rzecznych i retencjonowanych w zbiornikach. Metody PCA i FA zastosowano do opisu procesów zachodzących w wodach powierzchniowych oraz identyfikacji źródeł zasilania i pochodzenia substancji kształtujących skład fizykochemiczny wód [9, 17, 22, 23].

3. Charakterystyka obszaru badań

Zbiorniki Pakosław i Jutrosin położone są w zlewni rzeka Orli, która jest rzeką III rzędu, prawym dopływem rzeki Baryczy. Sumaryczna powierzchnia zlewni wynosi 1601,32 km². Według podziału Polski na regiony fizycznogeograficzne [8] zlewnia rzeki Orli położona jest na Nizinie Środkowopolskiej (318), na skraju południowo-zachodniej części Wysoczyzny Kaliskiej (318.12), która z kolei stanowi część Niziny Południowo-wielkopolskiej (318.1). Natomiast południową część zlewni zajmuje Kotlina Żmigrodzka (318.33) wchodząca w skład Obniżenia Milicko-Głogowskiego (318.3).

Źródło rzeki Orli znajduje się około 13 km na wschód od Koźmina Wlkp., rzeka uchodzi do Baryczy w miejscowości Wąsosz w km 34+600. Całkowita jej długość wynosi 95,11 km. Największymi dopływami Orli są rzeki: Masłówka, Dąbrocznia (Dąbroczna), Radęca (Rdęca), Żydowski Potok, Stara Orla, Borownica i Rów Graniczny.

Zbiorniki Pakosław i Jutrosin są zbiornikami lateralnymi, które zostały oddane do eksploatacji odpowiednio w latach 2007 i 2011. Powierzchnia zalewu przy normalnym poziomie piętrzenia (NPP) zbiornika Pakosław wynosi 26,6 ha, a zbiornika Jutrosin 90,5 ha. Podstawowe pa-

rametry morfometryczne zbiorników oraz charakterystyczne poziomy piętrzenia przedstawiono w tabeli 1. Zbiornik Pakosław położony jest na wysokości 32 km biegu rzeki Orli, a zbiornik Jutrosin na wysokości 46 km (rys. 1).

Tabela 1. Podstawowe parametry zbiorników retencyjnych Jutrosin i Pakosław
Table 1. Morphometric characteristic of Jutrosin and Pakosław off-channel Reservoirs

Parametr	Jednostka	Jutrosin	Pakosław
Powierzchnia zlewni	km ²	504,6	792,40
Klasa budowli	-	IV	IV
Rzędna MPP	m n.p.m.	99,00	94,45
Rzędna NPP	m n.p.m.	98,75	92,40
Poj. przy MPP	mln m ³	2,10	1,01
Poj. przy NPP	mln m ³	1,90	0,33
Poj. przeciwpowodziowa stała	mln m ³	0,20	0,68
Pow. zalewu przy MPP	ha	91,40	29,80
Pow. zalewu przy NPP	ha	90,50	26,60
Średnia głębokość przy MPP	m	2,35	3,40
Średnia głębokość przy NPP	m	2,10	1,30
Długość zbiornika	m	2 160	720

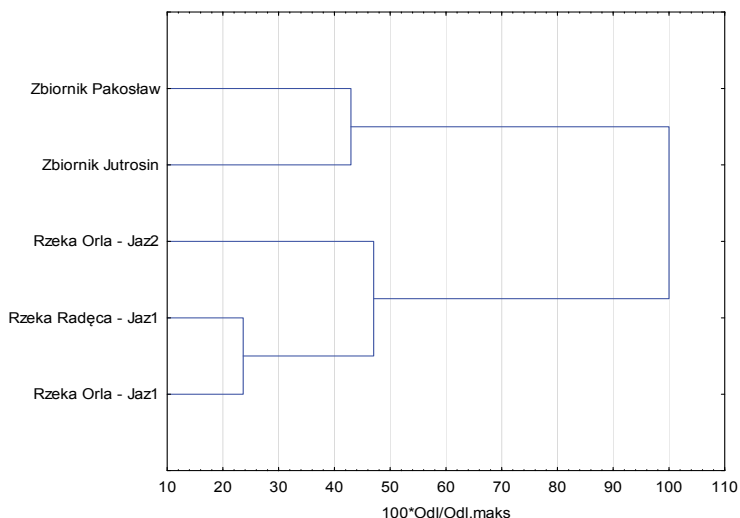
Omawiane zbiorniki wpływają korzystnie na bilans wodny rzeki Orli. Oba obiekty należą do zakresu przedsięwzięć melioracji podstawowych i z punktu widzenia zadań gospodarki wodnej, retencjonują nie tylko wodę dla potrzeb rolnictwa, ale także przyczyniają się do poprawienia warunków wodnych w glebie w zasięgu ich oddziaływania. Stwarzają także warunki rozwoju flory i fauny związanej z ekosystemem jeziornym.

W zlewni rzeki Orli wyznaczono Obszar Szczególnie Narazony (OSN) na zanieczyszczenia związkami azotu pochodzącymi ze źródeł rolniczych o powierzchni 1165,61 km², szczegółowy wykaz obrębów geodezyjnych został przedstawiony w Rozporządzeniu 4/2012 dyrektora RZGW we Wrocławiu w sprawie określenia wód powierzchniowych i podziemnych wrażliwych na zanieczyszczenie związkami azotu ze źródeł rolniczych oraz obszarów szczególnie narażonych, z których odpływ azotu ze źródeł rolniczych do wód należy ograniczyć.

4. Wyniki badań i dyskusja

Szczegółowa ocena stanu fizykochemicznego wód rzek Orli i Radęcy oraz w zbiornikach Jutrosin i Pakosław była przedmiotem wcześniejszej publikacji [15]. W pracy tej przeanalizowano szczegółowo jakość wód w lateralnych zbiornikach Pakosław i Jutrosin w pierwszych latach ich funkcjonowania na tle jakości wód rzek Orli i Radęcy.

Przeprowadzona analiza skupień wykazała, że wody retencjonowane w zbiornikach miały inny stan fizykochemiczny oraz charakteryzowały się inną zmiennością czasową od wód zasilających ich rzek (rys. 2). Ze względu na zróżnicowane jakości wód w rzekach i zbiornikach retencyjnych wynikające z charakteru procesów w nich zachodzących dalszą analizę statystyczną przy wykorzystaniu wielowymiarowych metod statystycznych przeprowadzono niezależnie dla wód stojących i płynących.

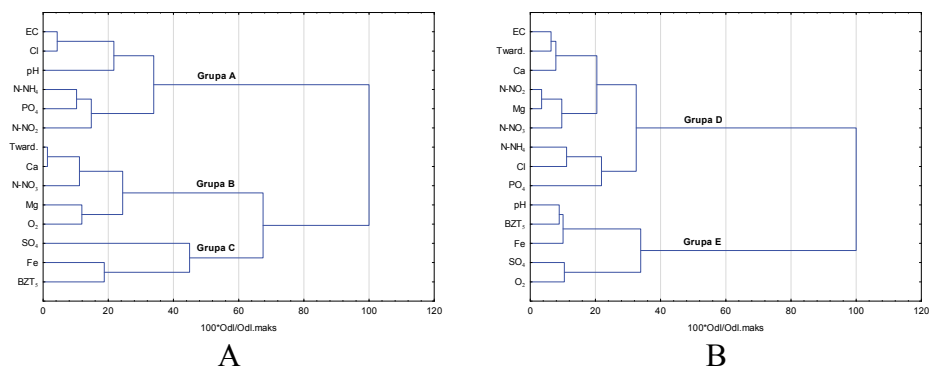


Rys. 2. Podział badanych punktów pomiarowo-kontrolnych na grupy za pomocą analizy skupień (CA)

Fig. 2. Location of control points division with groups for cluster analysis (CA)

Analiza skupień przeprowadzona w odniesieniu do badanych wskaźników jakości wody potwierdziła, że istnieje wyraźna różnica w składzie wód rzecznych i retencjonowanych w zbiornikach. Analiza

skupień pozwoliła na podział badanych wskaźników jakości oznaczanych w wodach rzek Orli i Radęcy na trzy grupy (rys. 3A). Największym podobieństwem charakteryzowały się stężenia wapnia, magnezu, azotu azotanowego oraz zawartość tlenu rozpuszczonego i twardości ogólnej – Grupa B.



Rys. 3. Podział wskaźników jakości wody na grupy o podobnej zmienności w wodach rzek Orli i Radęcy (A) oraz zbiornikach Jutrosin i Pakosław (B)
Fig. 3. Water quality factors division with similar groups for Orla and Radeca Rivers (A) due to Jutrosin and Pakoslaw Reservoirs (B)

Nieco mniejszym podobieństwem charakteryzowały się zmienności stężeń azotu azotanowego, amonowego, fosforanów chlorków oraz wartości pH i przewodnictwa – Grupa A. Występowanie tych związków w wodach rzecznych może być związane z punktowymi źródłami zanieczyszczeń. Zaobserwowano, że zależności wewnątrzgrupowe pomiędzy badanymi wskaźnikami jakości wody były silniejsze w wodach zbiorników niż w wodach rzek. Wskaźniki oznaczone w wodach retencionowanych w zbiornikach podzielono na dwie grupy (rys. 3B). W grupie pierwszej (Grupa D) znajdowały się wskaźniki, które w wodach rzecznych zakwalifikowano głównie do Grup A i B. Średnie zawartości tych związków były w zbiornikach retencyjnych niższe niż w wodach rzecznych, lecz charakteryzowały się większą zmiennością. Większa zmienność składu fizykochemicznego wód w zbiornikach wynika z ich lokalizacji i specyficznej konstrukcji. Zbiorniki lateralne zasilnie są wodami rzek okresowo. W okresie napełniania stan fizykochemiczny wód zbiorników zbliżony jest do stanu wód rzecznych, następnie zbiornik funkcjonuje

prawie niezależnie od rzeki, wody pobierane są tylko do utrzymania NPP. W zbiornikach zachodzą procesy samooczyszczania, sedymentacji zawiesiny, a w okresie wegetacyjnym pobieranie związków biogenych przez plankton i makrofity. Analizowane zbiorniki lateralne są zbiornikami młodymi i znajdują się w początkowej fazie funkcjonowania, przez co są jeszcze bardzo niestabilne.

Analiza czynnikowa (FA) umożliwiła zredukowanie zbioru 14 wskaźników jakości wody używanych pierwotnie do ich charakterystyki do czterech czynników wzajemnie ortogonalnych. Wyeksponowane czynniki mają wartości własne wyższe od jeden i objaśniają 79 i 90% wewnętrznej struktury danych pierwotnych odpowiednio w przypadkach wód rzecznych i tych retencjonowanych w zbiornikach (tab. 2). W pracy przyjęto założenie według [10], że gdy ładunki czynnikowe mają wartości od 0,5 do 0,75 oraz od 0,76 do 1,0 istnieje odpowiednio przeciętna lub silna zależność pomiędzy badanymi wskaźnikami jakości wody, a wyeksponowanymi czynnikami. W przypadku wód rzecznych pierwszy czynnik objaśnia około 31% zmienności zbioru danych pierwotnych i jest dodatnio skorelowany ze stężeniami tlenu rozpuszczonego, wapnia, magnezu, azotu azotanowego i twardością (tab. 2). Występowanie w wodach rzecznych wysokich stężeń wapnia, magnezu, a przede wszystkim azotu azotanowego, w równowadze z wysokimi stężeniami tlenu rozpuszczonego można wiązać ze spływami powierzchniowymi ze zlewni. Z drugim czynnikiem objaśniającym około 25% zmienności danych pierwotnych, dodatnio skorelowane były stężenia azotu amonowego, azotu azotynowego, fosforanów, chlorków oraz wartości pH i przewodnictwa (rys. 4A). Występowanie tych pierwiastków w równowadze w rzekach można wiązać z ich pochodzeniem ze źródeł punktowych.

Wody zbiorników charakteryzowały się inną dynamiką. Z pierwszym czynnikiem, wyjaśniającym aż 44% wewnętrznej struktury danych dodatnio skorelowane były stężenia azotu azotanowego, azotynowego, magnezu i tlenu rozpuszczonego, a ujemnie stężenia żelaza i wartości BZT₅. Z drugim czynnikiem skorelowane były dodatnio wartości przewodnictwa i twardość oraz stężenia azotu azotanowego i wapnia, a ujemnie pH oraz stężenia siarczanów i tlenu rozpuszczonego (rys. 4B). Występowanie innych związków pomiędzy oznaczanymi wskaźnikami jakości wody w zbiornikach a wyeksponowanymi czynnikami w odniesieniu do wód rzecznych ale przede wszystkim kierunku związków, może świadczyć

o odmiennym przebiegu procesu samooczyszczania: sedymentacji zawieszin, uwalnianiu pierwiastków z osadów dennych czy biosorpcja.

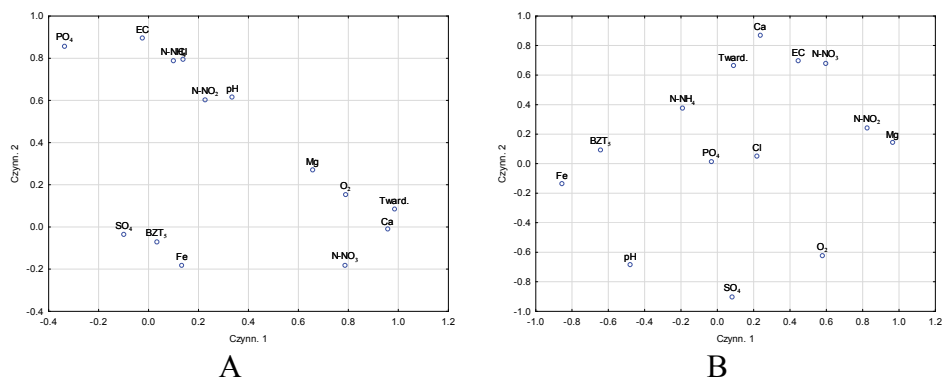
Tabela 2. Wyniki analizy czynnikowej rzek Orli i Radęcy (A) oraz zbiorników retencyjnych Jutrosin i Pakosław (B)

Table 2. The results of factor analysis of Orla and Radeca Rivers (A) due to Jutrosin and Pakoslaw Reservoirs (B)

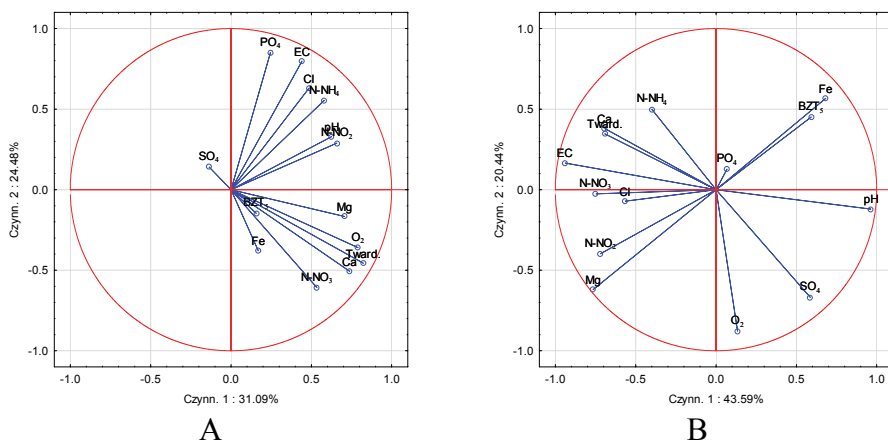
Parametr	A (Orla – Radęca)				B (Jutrosin – Pakosław)			
	Czynnik				Czynnik			
	1	2	3	4	1	2	3	4
EC [μS]	-0,02	0,90	-0,12	0,25	0,45	<u>0,70</u>	-0,00	-0,49
pH [-]	0,33	<u>0,62</u>	0,08	0,08	-0,48	<u>-0,68</u>	-0,11	0,49
Tward. [mg CaCO_3]	0,98	0,08	-0,00	0,05	0,09	<u>0,66</u>	<u>0,6</u>	-0,41
N-NH ₄ [mg dm^{-3}]	0,10	0,79	0,21	-0,11	-0,19	0,38	-0,48	<u>-0,68</u>
N-NO ₂ [mg dm^{-3}]	0,23	<u>0,60</u>	<u>0,62</u>	-0,12	0,82	0,24	-0,47	-0,17
N-NO ₃ [mg dm^{-3}]	0,79	-0,18	-0,04	-0,23	0,60	<u>0,68</u>	0,07	0,16
SO ₄ [mg dm^{-3}]	-0,10	-0,04	0,23	0,92	0,08	-0,90	0,10	0,12
Cl [mg dm^{-3}]	0,14	0,79	-0,32	0,13	0,22	0,05	0,30	-0,89
PO ₄ [mg dm^{-3}]	-0,34	0,86	0,03	-0,20	-0,03	0,01	-0,98	0,02
Ca [mg dm^{-3}]	0,96	-0,01	-0,01	0,13	0,24	0,87	0,04	0,06
Mg [mg dm^{-3}]	<u>0,66</u>	0,27	0,08	-0,16	0,96	0,15	0,08	-0,16
Fe [mg dm^{-3}]	0,13	-0,18	<u>0,52</u>	<u>-0,68</u>	-0,85	-0,13	-0,27	0,12
O ₂ [mg dm^{-3}]	0,79	0,15	0,33	-0,15	<u>0,58</u>	<u>-0,63</u>	0,20	0,21
BZT ₅ [mg dm^{-3}]	0,03	-0,07	0,92	0,14	<u>-0,64</u>	0,09	0,32	<u>0,63</u>
Wart. własne	4,35	3,43	1,82	1,43	6,10	2,86	2,13	1,57
Wariancja	31,1	24,5	13,0	10,2	43,6	20,4	15,2	11,2
Skumul. wariancja	31,1	55,6	68,6	78,8	43,6	64,0	79,2	90,4

Celem analizy składowych głównych była transformacja oznaczonych wskaźników jakości wody we wzajemnie ortogonalne nowe zmienne, które tworzą teoretyczny model opisujący strukturę zależności między nimi. Przeprowadzona analiza wykazała, że w przypadku wód rzecznych z pierwszą składową dodatnio związane były stężenia tlenu rozpuszczonego, wapnia i magnezu oraz twardość. Natomiast z drugą składową związane były stężenia chlorków i fosforanów oraz przewodnictwo (rys. 5A). Łącznie składowe te wyjaśniają 55% wewnętrznej struktury danych. W przypadku wód retencjonowanych w zbiornikach retencyjnych dwie pierwsze składowe objaśniają łącznie około 66% wewnętrznej struktury danych. Z pierwszą składową dodatnio związane były stężenia żelaza i pH a ujemnie stężenia magnezu, wapnia, azotu azotanowego i azotynowego oraz przewodnictwo. Natomiast z drugą

składową związane były ujemnie stężenia tlenu rozpuszczonego, magnezu i siarczanów (rys. 5B). Występowanie innych związków pomiędzy oznaczanymi wskaźnikami jakości wody w rzekach i zbiornikach a wyeksponowanymi składowymi świadczy o wyraźnym zróżnicowaniu ich stanu fizykochemicznego.



Rys. 4. Wykres rozrzutu ładunków czynnikowych względem dwóch pierwszych czynników dla wód rzek Orla i Radecy (A) oraz zbiorników Jutrosin i Pakosław (B)
Fig. 4. Scatter plot of factor loadings with respect to the first two factors for Orla and Radeca Rivers (A) and Jutrosin and Pakoslaw Reservoirs (B)



Rys. 5. Wyniki analizy składowych głównych dla wód rzek Orla i Radecy (A) oraz zbiorników Pakosław i Jutrosin (B)

Fig. 5. The results of principal components analysis for Orla and Radeca (A) Rivers due to Pakoslaw and Jutrosin Reservoirs (B)

W końcowym etapie na podstawie danych surowych przeprowadzono analizę dyskryminacyjną. Celem analizy dyskryminacyjnej było wskazanie wskaźników jakości wody, które najlepiej opisują różnice pomiędzy wodami rzeczными (Grupa A), a tymi retencjonowanymi w zbiornikach (Grupa B). Wyniki analizy dyskryminacyjnej DA wykonanej metodą standardową, krokową postępującą i krokową wsteczną zostały przedstawione w tabeli 3. Analiza dyskryminacyjna wykonana metodą standardową pozwoliła na zbudowanie funkcji dyskryminacyjnej (DF) wykorzystującej wszystkie 14 wskaźników jakości wody. Pozwoliło to na prawidłową klasyfikację wód rzecznych i wód w zbiornikach retencyjnych na poziomie 79.2%. Zdecydowanie lepsze wyniki klasyfikacji na poziomie około 96% uzyskano metodą krokową wsteczną natomiast przy pomocy metody krokowej postępującej klasyfikacja była możliwa na poziomie 100%. Funkcje dyskryminacyjne DFs w metodzie krokowej postępującej i wstecznej zostały zbudowane na podstawie odpowiednio dziewięciu (EC, Fe, Cl, BZT₅, SO₄, Tward., Mg, O₂, PO₄) i dwóch (EC i Fe) wskaźników jakości wody.

Tabela 3. Wyniki analizy dyskryminacyjnej; A – rzeki Orla i Radęca, B – Zbiorniki retencyjne Jutrosin i Pakosław

Table 3. Classification matrix for discriminate analysis of spatial variation of water quality parameters; A – Orla and Radęca Rivers, B – Jutrosin and Pakosław Reservoirs

Metoda klasyfikacji	% poprawnych	Typ wód	
		A	B
Metoda standardowa			
A	75,0	75,0	25,0
B	83,3	16,7	83,3
Średnia	79,2	-	-
Metoda krokowa postępująca			
A	100,0	100,0	0
B	100,0	0	100,0
Średnia	100,0	-	-
Metoda krokowa wsteczna			
A	100,0	100	0
B	91,7	91,7	8,3
Średnia	95,8	-	-

5. Wnioski

1. Przeprowadzona analiza skupień wykazała, że istnieje wyraźna różnica w składzie wód rzecznych i retencjonowanych w zbiornikach.
2. Woda retencjonowana w zbiornikach lateralnych charakteryzowała się większą zmiennością składu fizykochemicznego niż wody rzeczne wykorzystywane do ich zasilania. Wynika to z lokalizacji i specyficznej konstrukcji zbiorników oraz sposobu ich eksploatacji.
3. W okresie napełniania zbiorników stan fizykochemiczny ich wód zbliżony jest do stanu wód rzecznych, następnie zbiorniki zaczynają funkcjonować niezależnie od rzeki, a stan ich wód ulega wyraźnej zmianie.
4. Analiza czynnikowa umożliwiła zredukowanie zbioru 14 wskaźników jakości wody wykorzystywanych pierwotnie do ich charakterystyki do czterech wzajemnie ortogonalnych czynników. Charakter i kierunek zależności pomiędzy analizowanymi wskaźnikami jakości wody, a wyeksponowanymi czynnikami, świadczy o odmiennym przebiegu procesu samooczyszczania wód w zbiornikach.
5. Analiza składowych głównych potwierdziła wyraźną różnicę stanu fizykochemicznego wód rzecznych i retencjonowanych w zbiornikach.
6. Analiza dyskryminacyjna wykazała, że najbardziej reprezentatywnymi wskaźnikami jakości wody do oceny różnic w jakości wód rzecznych i retencjonowanych w zbiornikach są: EC, Fe, Cl, BZT₅, SO₄, Tward., Mg, O₂ i PO₄.

Literatura

1. **Akin B. S., Atici T., Katircioglu H. Keskin F.:** *Investigation of water quality on Gökçekaya dam lake using multivariate statistical analysis, in Eskişehir.* Environmental Earth Sciences. 63(6), 1251–1261 (2011).
2. **Astel A., Mazerski J., Polkowska Ż., Namieśnik J.:** *Application of PCA and time series analysis in studies of precipitation in Tricity (Poland).* Advances in Environmental Research. 8, 337–349 (2004).
3. **Boyacioglu H., Boyacioglu H.:** *Detection of seasonal variations in surface water quality using discriminant analysis.* Environmental monitoring and assessment. 162(1–4), 15–20 (2010).
4. **Brahman, K. D., Kazi, T. G., Afridi, H. I., Naseem, S., Arain, S. S., Wadhwa, S. K., Shah, F.:** *Simultaneously evaluate the toxic levels of fluoride and arsenic species in underground water of Tharparkar and possible contaminant sources. A multivariate study.* Ecotoxicology and environmental safety. 89, 95–107 (2013).

5. **Budka, A., Kayzer, D., Pietruczuk, K., Szoszkiewicz, K.:** *Zastosowanie wybranych procedur do wykrywania obserwacji nietypowych w ocenie jakości rzek*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. 3(II), 85–95 (2013).
6. **Dysarz T., Wicher-Dysarz J., Sojka M.:** *Two approaches to forecasting of sedimentation in the Stare Miasto reservoir*. Reservoir Sedimentation – Schleiss et al. (Eds), Taylor & Francis Group, London. 119–127 (2014).
7. **Dysarz, T., Wicher-Dysarz, J.:** *Analysis of flow conditions in the Stare Miasto Reservoir taking into account sediment settling properties*. Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 15, 584–605 (2013).
8. **Kanownik W., Kowalik T., Bogdał A., Ostrowski K., Rajda W.:** *Jakość i walory użytkowe potoku Szczyrzawy*. Zesz. Problem. Post. Nauk Rol. 561, 65–79 (2011).
9. **Kondracki J.:** *Geografia regionalna Polski*, Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 2000.
10. **Kowalkowski T., Zbytniewski R., Szpejna J., Buszewski B.:** *Application of chemometrics in river water classification*. Water Res. 40, 744–752 (2006).
11. **Liu C.W., Lin K.H. Kuo Y.M.:** *Application of factor analysis in the assessment of groundwater quality in a blackfoot disease in Taiwan*. The Since of the Total Environment. 313, 77–89 (2003).
12. **Mazurski J.:** *Podstawy chemometrii*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2000.
13. **Ostrowski K., Bogdał A.:** *Ocena jakości i walorów użytkowych potoku Wolnika w aspekcie jej retencjonowania w zbiorniku wodnym „Joniny”*. Zesz. Problem. Nauk Rol. 548, 425–434 (2010).
14. **Palma P., Alvarenga P., Palma V. L., Fernandes R. M., Soares A. M., Barbosa I. R.:** *Assessment of anthropogenic sources of water pollution using multivariate statistical techniques: a case study of the Alqueva’s reservoir*. Environmental monitoring and assessment. 165(1–4), 539–552 (2010).
15. **Przybyła Cz., Kozdrój P., Sojka M.:** *Ocena jakości wód w lateralnych zbiornikach Jutrosin i Pakosław w pierwszych latach funkcjonowania*. Inżynieria Ekologiczna. 39, 123–135 (2014).
16. **Rigacci L.N., Giorgi A.D., Vilches C.S., Ossana N.A., Salibián A.:** *Effect of a reservoir in the water quality of the Reconquista River*, Environmental monitoring and assessment. 185(11), 9161–9168 (2013).
17. **Sherstha S., Kazama F.:** *Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin*. Environmental Modelling & Software. 22, 464–475 (2007).

18. **Simeonov V., Sarbu C., Massart D.L., Tasakovski S.:** *Denube river water data modeling by multivariate data analysis.* Microchimica Acta. 137, 243–248 (2001).
19. **Simeonov V., Stratis J.A., Samara C., Zachariadis G., Voutsas D., Anthemidis A., Sofoniou M., Kouimtzis Th.:** *Assessment of the surface water quality in Northern Greece.* Water Res. 37, 4119–4124 (2003).
20. **Singh K.P., Malik A., Mohan D., Sinha S., Singh V.K.:** *Chemometric data analysis of pollutants in wastewater – a case study.* Analytical Chimica Acta. 532, 15–25 (2005).
21. **Singh K.P., Malik A., Mohan D., Sinha S.:** *Multivariate statistical techniques for the evaluation of spatial and temporal variations in water quality of Gomti Rivae (India) – a case study.* Water Res. 38, 3980–3992 (2004).
22. **Singh K.P., Malik A., Singh V.K.:** *Chemometric analysis of hydrochemical data of an alluvial river – a case study.* Water, Air and Soil Pollution. 170, 383–404 (2005).
23. **Singh K.P., Malik A., Sinha S.:** *Water quality assessment and apportionment of pollution sources of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques – a case study.* Analytical Chimica Acta. 538, 355–374 (2005).
24. **Sojka M., Murat-Błażejewska S.** *Wykorzystanie wielowymiarowych metod statystycznych do analizy jakości wód rzecznych.* Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 548(II), 513–524 (2010).
25. **Sojka M., Siepak M., Ziola A., Frankowski M., Murat-Błażejewska S., Siepak J.:** *Application of multivariate statistical techniques to evaluation of water quality in the Mała Węlna River (Western Poland).* Environ. Monit. Assess. 147, 159–170 (2008).
26. **Sojka M., Siepak M., Gnojska, E.:** *Ocena zawartości metali ciężkich w osadach dennych wstępnej części zbiornika retencyjnego Stare Miasto na rzece Powie.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 15, 1916–1928 (2013).
27. **Varol M.:** *Dissolved heavy metal concentrations of the Kralkızı, Dicle and Batman dam reservoirs in the Tigris River basin, Turkey.* Chemosphere. 93(6), 954–962 (2013).
28. **Varol M., Gökot B., Bekleyen A., Sen B.:** *Spatial and temporal variations in surface water quality of the dam reservoirs in the Tigris River basin, Turkey.* Catena. 92, 11–21 (2012).
29. **Wiatkowski M.:** *Wyniki badań jakości wody dopływającej i odpływającej z małego zbiornika wodnego Młyny na rzece Julianpolka.* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. 9, 297–318 (2008).
30. **Wiatkowski M.:** *Ocena jakości wody zbiornika Komorów na potoku Miliówka.* Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich. 8(2), 51–64 (2010).

31. **Wiatkowski M., Czamara W., Rosik-Dulewska Cz., Frycz K.:** *Charakterystyka jakości wody cieków zasilających projektowany zbiornik Racibórz.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 10, 519–531 (2010).
32. **Wiatkowski M., Głowski R., Kasperek R., Kościański S.:** *Ocena sposobu użytkowania zbiorników zaporowych małej retencji na terenie województwa opolskiego.* Nauka Przyr. Technol. 1, 2, #33 (2007).
33. **Wiatkowski M., Rosik-Dulewska C., Opolski U., Kuczewski K., Kasperek R.:** *Water Quality Assessment of Włodzienin reservoir in the First Year of Its Operation.* Rocznik Ochrona Środowiska (Annual Set the Environment Protection). 15, 2666–2682 (2013).
34. **Yidana, S. M., Ophori, D., & Banoeng-Yakubo, B.:** *A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data the Ankobra Basin, Ghana.* Journal of Environmental Management. 86, 80–87 (2008).
35. **Zhao Q., Liu S., Deng L., Yang Z., Dong S., Wang C., Zhang, Z.:** *Spatio-temporal variation of heavy metals in fresh water after dam construction: a case study of the Manwan Reservoir, Lancang River.* Environmental monitoring and assessment. 184(7), 4253–4266 (2012).

Application of Multivariate Statistical Methods in Water Quality Assessment of River-reservoirs Systems (on the Example of Jutrosin and Pakosław Reservoirs, Orla Basin)

Abstract

The paper presents a preliminary study of analysis water quality in the off-channel reservoirs Pakosław and Jutrosin using the multivariate statistical techniques. Because of high biogenic pollution in Orla and Radeca rivers, Jutrosin and Pakosław reservoirs were based on an innovative concept in which the reservoirs were built on areas directly adjacent to rivers. Series of studies in the off-channel reservoirs were compared with water quality of Orla and Radeca rivers. The Orla together with the water reservoirs forms a right-bank tributary of the Barycz river. The storage reservoirs, built in the year 2007 (Pakosław) and 2011 (Jutrosin) represents off-channel reservoirs placed outside of the water course, but in its direct neighborhood. The reservoirs are filled by the water of Orla river from the water intake localized before the weir, while the water discharge into the river bed takers place through a discharge construction localized below the weir. Area of the Pakosław water reservoir is 26.6 ha and Jutrosin 90.5 ha.

The multivariate statistical techniques such as cluster analysis (CA), factor analysis (FA), principal components analysis (PCA), and discriminant analysis (DA) were taken advantage to interpretation and evaluation data. The aim of the present research was to use chemometric techniques (CA, PCA, FA and DA) in order to: discover similarities and differences in the physico-chemical composition of water in off-channel reservoirs and rivers, identify water quality indicators suited to its temporal and spatial variability, expose hidden factors accounting for the structure of the data, and identify man-made sources of water pollution.

Cluster analysis (CA) showed that there is unmistakable difference between water quality in the reservoirs and rivers. More evident fluctuation in the physico-chemical composition were observed in reservoirs compared to rivers. This is the result of unique location and their maintenance. Factors of water quality during the refilling reservoirs were comparable. Afterwards the off-channel reservoirs and rivers works separately. Factor analysis (FA) confirmed different process of self-purification in reservoirs due to rivers. Typical for physico-chemical composition of water are indexes like Conductivity, Fe, Cl, BOD, SO₄, Ca, Hardness, Mg, O₂ and PO₄. This is the result of discriminant analysis (DA).

Słowa kluczowe:

wielowymiarowe metody statystyczne, rzeka Orla, zbiornik lateralny, jakość wody

Keywords:

multivariate statistical methods, Orla river, off-channel reservoir, water quality