

IDENTYFIKACJA PROCESÓW KSZTAŁTUJĄCYCH SKŁAD CHEMICZNY MAŁEGO CIEKU W KRAJOBRAZIE ROLNICZYM NA PODSTAWIE ANALIZY CZYNNIKOWEJ

Piotr BANASZUK

Politechnika Białostocka, Zakład Ekologii Krajobrazu

Słowa kluczowe: analiza czynnikowa, azotany, migracja jonów, wody powierzchniowe

Streszczenie

Wyróżniono cztery główne czynniki kształtujące skład chemiczny cieku. Są one związane ze stanami i przepływami wód. Czynniki A ma największe znaczenie w trakcie wezbrań wiosennych i wiąże się z intensywnym wymywaniem z gleb łatwo rozpuszczalnych jonów, głównie NO_3^- i SO_4^{2-} , których stężenie osiąga w tym okresie maksimum. Podczas wysokich stanów wód, m.in. w trakcie opadania wiosennej fali wezbraniowej lub po intensywnych opadach, skład chemiczny cieku jest kształtowany głównie przez odpływ gruntowy, wynoszący z obszaru zlewni jony: Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} (czynnik C). W okresie niżówek na skład chemiczny wód wpływa przede wszystkim zasilanie przez wody głębokiego krążenia o zwiększonym stężeniu SiO_3^{2-} , Mg^{2+} , $\text{Fe}^{2+/3+}$ i Na^+ (czynnik D). W tym czasie w warunkach niskiego potencjału redox z osadów dennych uwalniane są mobilne związki P i Fe, co powoduje maksymalne ich stężenie w rzece (czynnik B). Stwierdzono, że szczegółowa identyfikacja zjawisk hydrochemicznych wymaga analizy statystycznej danych oddzielnie dla poszczególnych okresów hydrologicznych.

WSTĘP

Związki chemiczne rozpuszczone w wodzie rzecznej pochodzą z opadu atmosferycznego, procesów wietrzenia chemicznego w glebie i głębszym podłożu oraz z obiegu biologicznego. Dużą rolę w kształtowaniu składu chemicznego wód po-

Adres do korespondencji: dr P. Banaszuk, Politechnika Białostocka, Zakład Ekologii Krajobrazu, ul. Wiejska 45a, 15-351 Białystok; tel. +48 (85) 746-96-58, e-mail: banaszuk@pb.bialystok.pl

wierzchniowych odgrywa także działalność człowieka, szczególnie na terenach zurbanizowanych lub wykorzystywanych rolniczo [GRODZIŃSKA, 1993; HAAG, KAUPENJOHANN, 2001; ISERMANN, ISERMANN, 1997; KOSTRZEWSKI, MAZUREK, ZWOLIŃSKI, 1994; LINDBERG i in., 1985; 1989]. Substancje chemiczne mogą pochodzić z wielu źródeł, a ich ilość może być bardzo zmienna w czasie, co w znacznym stopniu utrudnia identyfikację źródła i ocenę wielkości dostarczanego ładunku.

Wykorzystana w niniejszej pracy analiza czynnikowa, należąca do grupy analiz wielowymiarowych, jest stosowana zarówno do opisu, eksploracji danych, wyodrębniania spośród nich powtarzalnych wzorców, jak i do wyjaśniania obserwowanych zjawisk przez testowanie postawionych hipotez. W badaniach hydrochemicznych używa się jej do opisu procesów zachodzących w wodach powierzchniowych i podziemnych oraz identyfikacji źródeł zasilania i pochodzenia substancji kształtujących skład chemiczny wód. W wielu przypadkach stosowano ją w celu identyfikacji źródeł zanieczyszczeń lub przestrzennego opisu procesów wietrzenia i migracji jonów w środowisku wodnym [PUCKET, BRICKER, 1992; REEDER i in., 1972].

Stosunkowo mało jest przykładów wykorzystania analizy czynnikowej (lub blisko z nią związanej analizy głównych składowych) do opisu zjawisk hydrochemicznych w ujęciu czasowym [EVANS i in., 1996]. Spływ jonów obserwowany w cieku w ciągu roku jest uzależniony przede wszystkim od warunków hydro-meteorologicznych i natężenia przepływu. Na transport fluwialny w znaczącym stopniu wpływają jednak także inne czynniki lub cechy środowiska, które czasami trudno zmierzyć lub sparametryzować [KOSTRZEWSKI, MAZUREK, ZWOLIŃSKI, 1994]. Analiza czynnikowa wydaje się odpowiednim narzędziem, umożliwiającym syntetyczną charakterystykę oddziaływania zlewni i sposobu zasilania cieku na sezonową zmienność transportu fluwialnego.

W niniejszej pracy wykorzystano analizę czynnikową do wykrycia i opisu procesów kształtujących dynamikę składu chemicznego niewielkiego cieku w krajo-brazie rolniczym.

OBIEKT BADAŃ

Analizowano skład chemiczny wód rzeki Awissa, wpadającej do Narwi w granicach Narwiańskiego Parku Narodowego (rys. 1). Powierzchnia zlewni Awissy wynosi 122,4 km², z czego 54% stanowią grunty orne, 18% użytki zielone, 19% lasy i 9% tereny zabudowane. Lasy, to głównie bory sosnowe na przepuszczalnych utworach piaszczystych i żwirowych, zajmujących najwyżej wyniesione fragmenty terenu, oraz olsy na utworach organicznych w dolinach cieków i obniżeniach bezodpływowych. Użytki zielone występują przede wszystkim na utworach organicznych, głównie płytkich i średniogłębokich, zmurszałych torfach, wypełniających doliny Awissy i jej dopływów. Uprawa płużna obejmuje gleby brunatne, płowe



Rys. 1. Zlewnia Awissy

Fig. 1. The Awissa River catchment

i miejscami – na terenach z płytkim poziomem wód gruntowych – czarne ziemie wytworzone z piasków naglinowych i glin. Pola orne są uprawiane z zastosowaniem stosunkowo dużych dawek nawozów mineralnych. Ich roczne zużycie na 1 ha jest większe niż przeciętnie w północno-wschodniej Polsce i wynosi około 80–100 kg N, 15–20 kg P i 20–30 kg K. Dominującymi uprawami są rośliny okopowe, zboża, miejscami warzywa.

Średnia roczna temperatura powietrza (lata 1956–2000) na obszarze badań wynosi 6,9°C, roczne sumy opadów atmosferycznych kształtują się na poziomie 587 mm (dane z IMGW Białystok). Opady maksymalne występują latem, a suma opadów z półrocza kwiecień-wrzesień stanowi ponad 60% sumy rocznej. Burze występują średnio przez 20–25 dni w roku.

METODY BADAŃ

PRACE TERENOWE I LABORATORYJNE

Próbki wód rzecznych pobierano w odstępach siedmiodniowych w okresie od 2 listopada 2001 r. do 12 listopada 2002 r. na przekroju wodowskazowym w miejscowości Płonka Kościelna. Natężenie przepływu Q obliczano na podstawie krzywej przepływu udostępnionej przez Zarząd Narwiańskiego Parku Narodowego.

Krzywa została uzupełniona przez dwa własne pomiary przepływu wykonane w trakcie niskich stanów wód, w lipcu i sierpniu.

W próbkach oznaczono następujące parametry fizykochemiczne: przewodniczość właściwa EC_{25} – konduktometrycznie, potencjał utleniająco-redukcyjny Eh – potencjometrycznie, HCO_3^- – miareczkowo, Ca^{2+} , Mg^{2+} – ASA, Na^+ , K^+ – fotometrycznie, NO_3^- , NH_4^+ , PO_4^{3-} , SO_4^{2-} , SiO_3^{2-} , Cl^- , $Fe^{2+/3+}$ – spektrofotometrycznie, stosując odczynniki Spectranal firmy Riedel-de Haen, P_{og} – spektrofotometrycznie po mineralizacji próby za pomocą kwasu siarkowego i nadtlenu wodoru, tlen rozpuszczony O_2 – sondą Windhaus.

Zakres oraz wartości średnie przepływów i oznaczonych parametrów wód przedstawiono w tabeli 1.

Sumy opadów z 5 dni poprzedzających pobór próbek wody rzecznej obliczono na podstawie dobowych sum opadów mierzonych na stacji meteorologicznej w Białymstoku.

Tabela 1. Przepływ i właściwości fizykochemiczne wód Awissy w roku hydrologicznym 2001/2002

Table 1. Water discharge and physical and chemical properties of water in the Awissa River in hydrological year 2001/2002

Parametr Parameter	Jednostka Unit	Liczba próbek Number of samples	Wartość Value				SD
			min	średnia average	mediana median	max	
Q	$m^3 \cdot s^{-1}$	55	0,01	0,30	0,06	4,05	0,71
Eh	mV	55	141,0	187,2	187,5	265,0	26,8
EC_{25}	$\mu S \cdot cm^{-1}$	55	439	605	589	782	58
Ca^{2+}	$mg \cdot dm^{-3}$	55	81,5	110,2	94,1	199,3	31,0
Mg^{2+}	$mg \cdot dm^{-3}$	55	9,1	16,4	16,9	21,0	2,7
K^+	$mg \cdot dm^{-3}$	55	1,9	5,1	5,0	9,7	1,5
Na^+	$mg \cdot dm^{-3}$	55	5,6	9,4	9,4	13,0	1,4
NH_4^+	$mg \cdot dm^{-3}$	55	0,00	0,44	0,31	2,23	0,41
$Fe^{2+/3+}$	$mg \cdot dm^{-3}$	55	0,00	0,18	0,15	0,70	0,16
HCO_3^-	$mg \cdot dm^{-3}$	49	166,0	311,7	325,2	362,5	44,1
Cl^-	$mg \cdot dm^{-3}$	55	10,0	19,3	18,9	36,0	4,9
SO_4^{2-}	$mg \cdot dm^{-3}$	55	14,1	44,2	43,0	85,0	16,4
NO_3^-	$mg \cdot dm^{-3}$	55	0,17	6,07	3,93	28,91	7,27
SiO_3^{2-}	$mg \cdot dm^{-3}$	55	0,5	4,7	4,4	11,2	2,8
PO_4^{3-}	$mg \cdot dm^{-3}$	55	0,18	0,64	0,52	1,50	0,34
P_{og}	$mg \cdot dm^{-3}$	55	0,07	0,25	0,20	0,79	0,14
O_2	$mg \cdot dm^{-3}$	55	2,9	6,8	6,9	9,7	1,5

Objaśnienia: SD – odchylenie standardowe. Explanations: SD – standard deviation.

METODY STATYSTYCZNE

Do opracowania statystycznego wyników zastosowano analizę czynnikową, będącą wielowymiarową metodą statystyczną, która dzięki zmniejszeniu liczby zmiennych opisujących obiekty umożliwia odkrycie współzależności między zmiennymi, a nawet wykrycie czynników, „ukrytych struktur”, niedostępnych w bezpośredniej obserwacji, a decydujących o charakterze współzależności. Zastępując zmienne pierwotne przez czynniki, analiza czynnikowa dostarcza prostego, a zarazem zwięzłego opisu złożonej sieci wzajemnych powiązań wewnątrz opracowywanego zbioru danych [RACINE, REYMOND, 1977]. Czynniki są wektorami prostopadłymi do siebie w wielowymiarowej przestrzeni definiowanej przez liczbę zmiennych użytych do analizy. W przeciwieństwie do zmiennych pierwotnych czynniki są wzajemnie nieskorelowane. W celu wzmocnienia związków między wykrytymi czynnikami i tworzącymi je zmiennymi osie układu współrzędnych poddaje się rotacji w przestrzeni wielowymiarowej, np. rotacji typu Varimax. W ostatecznym opisie wyników analizy uwzględnia się tylko te czynniki, których tzw. wartości własne, zwane też pierwiastkami latentnymi (ang. eigenvalue), są równe jedności lub wyższe [MORRISON, 1990].

Czynniki są opisywane przez ładunki czynnikowe (odpowiadające współczynnikom korelacji), które wnoszą w ich kształt zmienne pierwotne. Ładunki zbliżone do ± 1 wskazują na bardzo silny związek między czynnikiem i zmienną oraz bardzo duży udział zmiennej w konstrukcji czynnika, natomiast wartości zbliżone do 0 świadczą o braku związku.

Ostateczna interpretacja wykrytych czynników powinna nastąpić po skartowaniu wartości czynnikowych, tj. wartości (wag) obliczonych dla każdej jednostki obserwacji (np. miejsca lub terminu poboru próbek) ze względu na każdy z wyodrębnionych czynników.

Do opracowania statystycznego danych z całego roku hydrologicznego użyto 14 z 17 analizowanych parametrów fizykochemicznych. Z powodu silnej korelacji między zawartością wapnia, wodorowęglanów i przewodnictwem właściwym wody, te trzy zmienne zastąpiono jednym parametrem – EC_{25} . Brak związków korelacyjnych między stężeniem jonu NH_4^+ i wyznaczonymi czynnikami spowodował wyłączenie go z analiz. Większość zmiennych była transformowana w celu uzyskania rozkładu zbliżonego do normalnego. Dane mające rozkład prawoskośny logarytmowano lub pierwiastkowano, a mające rozkład lewoskośny podnoszono do kwadratu. Macierz czynnikową rotowano z zastosowaniem rotacji Varimax.

Wartości czynnikowe obliczono za pomocą regresji wielokrotnej dla każdego czynnika i terminu analizy składu chemicznego cieku. Terminy pobierania próbek stosunkowo równomiernie rozkładają się na wszystkie stany charakterystyczne rzeki, toteż można sądzić, że został spełniony warunek ich losowego rozkładu [JOBSON, 1991].

WYNIKI I DYSKUSJA

W celu interpretacji wyników analizy czynnikowej danych z całego roku hydrologicznego przyjęto, że związki zmiennej pierwotnej z czynnikiem są silne wówczas, gdy wartości bezwzględne jej ładunków są większe od 0,75. Na związki umiarkowane wskazują wartości ładunków w zakresie 0,40–0,75, natomiast ładunki zawierające się w przedziale (–0,40; 0,40) uznano za nieistotne i pominięto. Zaproponowane przedziały ładunków czynnikowych przyjęto arbitralnie, ponieważ nie ma prostej i jednoznacznej metody oceny istotności ładunków i ich wkładu w konstrukcję czynnika [CHILD, 1970]. Podobne przedziały zastosowali m.in. EVANS i in. [1996] oraz PUCKETT i BRICKER [1992].

Czynniki wpływające na zmienność składu chemicznego cieku omawiane są jako A–D. Czynniki A wyjaśnia wariację składu chemicznego wód Awissy w 41% (tab. 2). Dodatkowo ładunki czynnikowe dla jonu azotanowego, siarczanowego i wartości przepływu Q , a także największe natężenie czynnika w miesiącach wczesnowiosennych (rys. 2) jednoznacznie wskazują, że czynnik ten należy interpretować

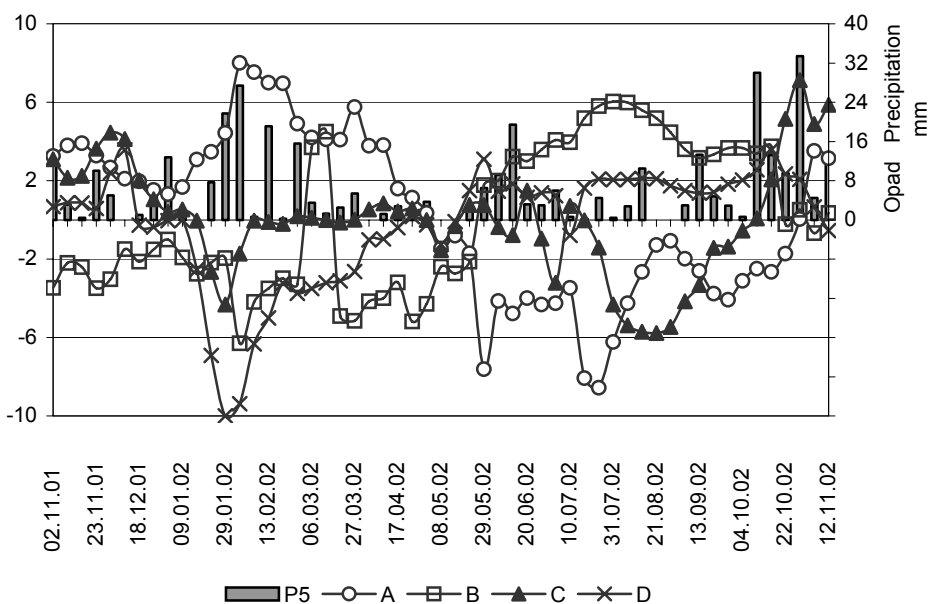
Tabela 2. Macierz ładunków czynnikowych dla danych z całego roku hydrologicznego, rozwiązanie z rotacją Varimax

Table 2. Varimax rotated factor loadings matrix, whole dataset

Zmienna Variable	Czynnik Factor			
	A	B	C	D
$\ln EC_{25}$	–	–	0,545	0,648
Eh	–	–0,831	–	–
$(Mg^{2+})^2$	–	0,437	–	0,675
$\ln K^+$	–	–	0,824	–
Na^+	–	–	0,616	0,567
$\ln Cl^-$	–	–	0,910	–
SO_4^{2-}	0,595	–	0,688	–
$\ln NO_3^-$	0,799	–	–	–
$\ln P_{og}$	–0,721	0,630	–	–
$(PO_4^{3-})^{1/2}$	–0,734	0,631	–	–
$\ln Fe^{2+/3+}$	–0,468	–	–	0,732
$\ln SiO_3^{2-}$	–	0,932	–	–
O_2	0,852	–	–	–
$\ln Q$	0,405	–0,476	–	–0,706
Wyjaśnienie wariancji przez czynnik, %	41	23	11	10
% Variance explained				

Objaśnienia: „–” ładunki czynnikowe z przedziału (–0,40; 0,40) uznane za nieistotne i wykluczone z tabeli.

Explanation: „–” factor loadings (–0.40; 0.40) were assumed non significant and excluded.



Rys. 2. Dynamika wartości czynnikowych w roku hydrologicznym 2001/2002 na tle czasowej zmienności opadów (*A–D* – czynniki, *P5* – suma opadów z 5 dni poprzedzających pobór próbek)

Fig. 2. Factor scores in hydrological year 2001/2002 in relation to rainfall (*A–D* – factor scores, *P5* – sum of precipitation from 5 days before water sampling)

jako „wmywanie z gleb mobilnych jonów przez spływ powierzchniowy i podpowierzchniowy wywołany roztopami lub/i opadami”. Topniejąca pokrywa śnieżna w połączeniu z dosyć intensywnymi opadami deszczu wczesną wiosną powoduje silne wmywanie azotanów i innych łatwo rozpuszczalnych jonów z gleb (m.in. EVANS i in. [1996], PIONKE i in. [1996], WITKOWSKI [1997]). Wmywanie jest największe w połowie lutego, wyraźnie zmniejsza się w pierwszych tygodniach marca, ponownie nasila się po opadach w początkach kwietnia, a od połowy kwietnia zanika. W lutym 2002 r. zarejestrowano największe stężenie azotanów – około 29 mg dm^{-3} . Z czynnikiem A ujemnie skorelowane jest stężenie $\text{Fe}^{2+/3+}$ i PO_4^{3-} , co świadczy, że największe stężenie tych jonów występuje podczas niskich stanów wód, a w trakcie wezbrań zmniejsza się na skutek rozcieńczania lub ze względu na warunki geochemiczne (potencjał redox, odczyn) ich uwalnianie z osadów dennych lub transport z innych źródeł są w znacznym stopniu ograniczone.

Czynnik A traci swoje dominujące znaczenie pod koniec kwietnia. Wymywanie azotanów i siarczanów z obszaru zlewni prowadzi jeszcze kilkakrotnie w ciągu roku do większego stężenia tych jonów w wodach rzecznych. W czasie badań zdarzyło się to w listopadzie 2001 r., a także w połowie września oraz na przełomie października i listopada 2002 r. (rys. 2).

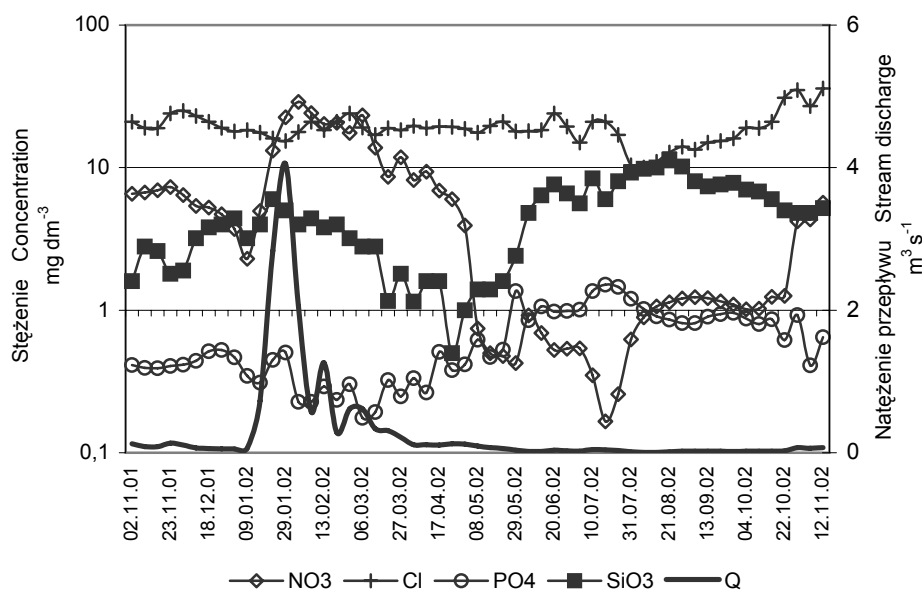
Procesy kształtujące skład chemiczny cieku podczas niżówek opisuje czynnik B (23% wyjaśnionej wariancji). Ma on dominujące znaczenie od czerwca do początku października (rys. 2), kiedy mała zawartość rozpuszczonego tlenu oraz niski potencjał redox sprzyjają uwalnianiu z osadów dennych mobilnych form fosforu, najprawdopodobniej głównie z połączeń z żelazem. Maksimum stężenia P_{og} , PO_4^{3-} i $Fe^{2+/3+}$ zaobserwowano w lipcu i sierpniu, odpowiednio około 0,8, 1,50 i 0,7 $mg \cdot dm^{-3}$. Należy dodać, że letnie zwiększenie się stężenia żelaza i fosforu może być w pewnym stopniu efektem intensywnego parowania w warunkach małego zasilania cieku. Ewapotranspiracja nie może być jednak główną przyczyną zwiększenia stężenia fosforu, ponieważ nie wpływa ona znacząco na stężenie innych jonów, na przykład chlorków czy sodu.

Czynnik B jest silnie dodatnio skorelowany ze stężeniem jonu krzemianowego i umiarkowanie silnie ze stężeniem jonów magnezu (tab. 2). Na zwiększenie stężenia tych składników może mieć wpływ zasilanie cieku przez wody głębszego krążenia przemieszczające produkty wietrzenia minerałów wchodzących w skład poziomu wodonośnego [MACIOSZCZYK, DOBRZYŃSKI, 2002]. Dominacja czynnika ustaje z chwilą zwiększenia przepływu i udziału spływu podpowierzchniowego i powierzchniowego w odpływie rzeczny.

Czynnik C, wyjaśniający 11% wariancji składu chemicznego wód Awissy (tab. 2), wiąże się z procesem wymywania chlorków, siarczanów, potasu, sodu i wapnia z obszaru zlewni. O wymywaniu Ca^{2+} można wnioskować pośrednio na podstawie przewodnictwa właściwego wody, z którym stężenie tego jonu jest silnie dodatnio skorelowane. Większe wymywanie występuje kilkakrotnie w ciągu roku: na początku marca i w kwietniu, po intensywniejszych opadach w czerwcu i lipcu oraz w trakcie opadów jesiennych w październiku i listopadzie, kiedy czynnik C jest jednym z dominujących i najsilniej kształtujących spływ jonowy (rys. 2).

Najmniejszy wpływ na skład chemiczny cieku ma czynnik D (10% wariancji). Jest on umiarkowanie dodatnio skorelowany ze stężeniem magnezu, sodu i żelaza oraz przewodnictwem wody EC_{25} , a także ujemnie skorelowany z przepływem (tab. 2). Należy go utożsamiać z zasilaniem cieku przez zasobne w magnez, sód i żelazo wody z głębszych poziomów wodonośnych w czasie niskich stanów wód w okresie od czerwca do września i w grudniu (rys. 2).

Opracowanie statystyczne danych hydrochemicznych reprezentujących cały rok hydrologiczny daje możliwość uzyskania jedynie ogólnej, uśrednionej charakterystyki zjawisk i procesów kształtujących skład chemiczny cieku. Wyniki analizy w sposób niedoskonały pokazują zjawiska epizodyczne. „Surowe” dane analityczne wskazują na przykład, że w trakcie wezbrania wiosennego niemalże równocześnie, z niewielkim tylko przesunięciem w czasie, oprócz maksimum stężenia azotanów, występuje większe stężenie jonów ortofosforanowych, krzemianowych i chlorkowych (rys. 3). Mimo to jony te zostały włączone do trzech zupełnie różnych czynników. Wynika to z faktu, że nawet wyraźna, ale krótkookresowa korelacja, istniejąca między parametrami fizykochemicznymi wód (np. tylko podczas



Rys. 3. Stężenie wybranych jonów w roku hydrologicznym 2001/2002

Fig. 3. Concentration of selected ions in hydrological year 2001/2002

wysokich przepływów wiosną), w skali całego roku jest osłabiana przez wielomiesięczny okres braku związków. Dlatego też zmienne, mimo pewnego czasowego podobieństwa, mogą być zaliczane do oddzielnych grup o zupełnie różnym przebiegu natężenia wartości czynnikowych.

Bardziej szczegółowy statystyczny opis dynamiki i współzależności wymywania składników mineralnych do wód powierzchniowych w trakcie wezbrania i opadania fali wezbraniowej można uzyskać na podstawie wyników analizy czynnikowej wykonanej dla danych z okresu od 16 stycznia do 10 kwietnia 2002 r. (14 prób próbek wód). Do obróbki statystycznej wybrano 13 z 17 zmiennych. Z powodu silnych autokorelacji z analizy wykluczono przewodność właściwe wody EC_{25} , potencjał redox Eh , stężenie wodorowęglanów i fosforu ogólnego.

Wyróżniono trzy czynniki. Podobnie, jak w przypadku wyników dla całego roku, najistotniejszy czynnik (A, 42% wariancji) jest wysoko dodatnio skorelowany ze stężeniem azotanów, rozpuszczonego tlenu i natężeniem przepływu. Dodatkowo ujawnił się niewidoczny wcześniej silny związek czynnika ze stężeniem jonu krzemianowego. Ujemne korelacje z czynnikiem stwierdzono w przypadku stężenia sodu, magnezu i żelaza (tab. 3).

Czynnik B, dodatnio skorelowany ze stężeniem wapnia, magnezu, chlorków, siarczanów i ujemnie ze stężeniem potasu i ortofosforanów, osiąga najniższe wartości podczas maksimum wezbrania (rys. 4). Słabo zmineralizowane wody rozto-

Tabela 3. Macierz ładunków czynnikowych dla danych z okresu wysokich stanów wiosennych (16.01–10.04.2002 r.), rozwiązanie z rotacją Varimax

Table 3. Varimax rotated factor loadings, subset of data representing snow-melt flood (16.01–10.04.2002)

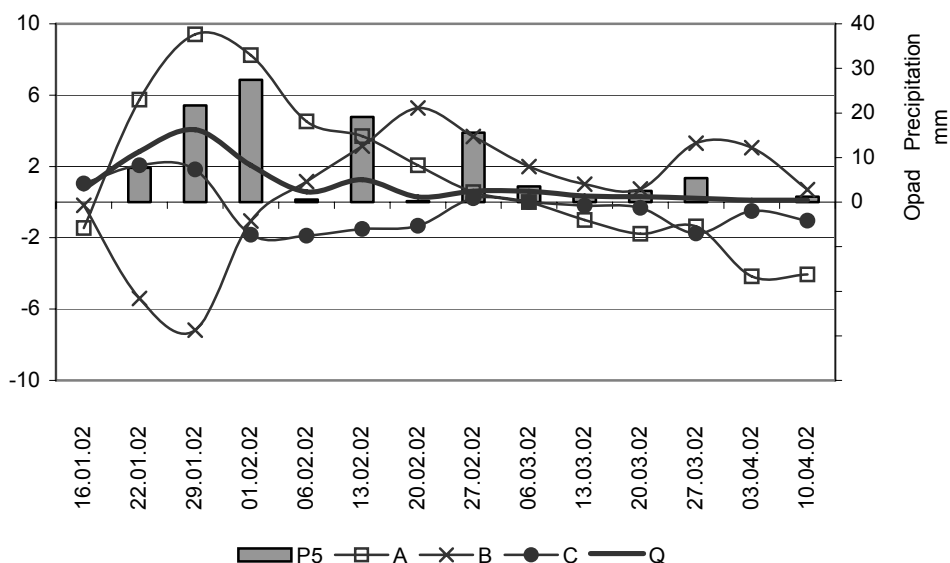
Zmienna Variable	Czynnik Factor		
	A	B	C
ln Ca ²⁺	–	0,717	–
(Mg ²⁺) ²	–0,706	0,563	–
K ⁺	–	–0,790	–
Na ⁺	–0,910	–	–
Cl [–]	–	0,721	–
SO ₄ ^{2–}	–	0,849	–
NO ₃ [–]	0,911	–	–
ln NH ₄ ⁺	–	–	0,875
PO ₄ ^{3–}	–	–0,638	0,660
ln Fe ^{2+/3+}	–0,908	–	–
SiO ₃ ^{2–}	0,861	–	–
O ₂	0,778	–	–
ln Q	0,875	–	–
Wyjaśnienie wariancji przez czynnik, % % Variance explained	42	26	12

Objaśnienia jak pod tabelą 2. Explanations as in Tab. 2.

powe wyraźnie zmniejszają stężenie Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄^{2–} i Cl[–] w rzece. Zwiększenie stężenia tych jonów rozpoczyna się w początkach lutego, osiągając maksimum około 20 lutego. Kolejne zwiększenie stężenia przypada na pierwsze tygodnie kwietnia.

W początkowej fazie wezbrania do cieków trafiają także pewne ilości jonów ortofosforanowych i amonowych (czynnik C, tab. 3, rys. 4).

Na podstawie wyników oraz obserwacji terenowych można stwierdzić, że w pierwszej fazie wezbrania wczesnowiosennej wody roztopowe płynące po powierzchni gleby rozmarzniętej do głębokości najwyżej kilku centymetrów wnoszą do cieków fosfor (często związany z cząsteczkami gleby), koloidalną krzemionkę, jon amonowy i niewielkie ilości azotanów. Na znaczący wpływ intensywnych opadów i zmywu powierzchniowego na eksport ortofosforanów ze zlewni rolniczych wskazują m.in. HEATHWAITE i DILS [2000], PETRY i in. [2002] oraz PIONKE i in. [1996]. Duża część ładunku jonów amonowych w odpływie rzeczny w pierwszej fazie wezbrania pochodzi z atmosfery. Azot mineralny, zakumulowany w pokrywie śnieżnej w postaci związków zawartych w opadzie lub znajdujących się na powierzchni śniegu jako sucha depozycja, uwalnia się w trakcie topnienia śniegu. Badania składu chemicznego śniegu wykonane tuż przed roztopami



Rys. 4. Dynamika wartości czynnikowych (czynników A–C) w czasie wysokich stanów wiosennych (16.01–10.04.2002 r.) na tle zmienności opadów (P5) i natężenia przepływu Q

Fig. 4. Factor scores (A–C), subset of data representing snow-melt flood (16.01–10.04.2002) in relation to rainfall (P5) and stream discharge Q

wykazały stężenie jonu amonowego na poziomie $0,3\text{--}0,4\text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Jest to ilość podobna lub niewiele tylko mniejsza od zarejestrowanej w wodzie rzecznej na początku stycznia 2002 r., kiedy wynosiła ona od $0,4$ do $0,5\text{ mg}\cdot\text{dm}^{-3}$. Stężenie innych jonów w topniejącym śniegu było wielokrotnie mniejsze niż w wodzie rzecznej.

Wraz z postępującym rozmarzaniem gleb nasila się wymywanie azotanów i uruchamianie jonu krzemianowego. Bardzo wyraźne zwiększenie stężenia jonu NO_3^- w rzece obserwowano w czasie, kiedy przeciętna grubość rozmarznionej warstwy gleb wynosiła $10\text{--}15\text{ cm}$, czyli w przybliżeniu odpowiadała miąższości poziomu próchnicznego. Należy zatem sądzić, że stropowe warstwy gleby są podczas wezbrania ważnym źródłem jonu azotanowego i krzemianowego [BROWN i in., 1999]. Duże ilości azotanów mogą być również wymywane z podtopionych gleb organicznych występujących w dnie doliny Awissy.

W tym czasie słabo zmineralizowane wody roztopowe i opadowe docierające do cieków powodują zmniejszenie stężenia większości kationów i niektórych anionów (SO_4^{2-}). Większy eksport wapnia, magnezu, chlorków i siarczanów rozpoczyna się później, dopiero po uruchomieniu splotu podpowierzchniowego i odpływu siecią drenarską, który w 2002 r. rozpoczął się na początku lutego. Współzależność występowania czynnika B z przepływami, na które znaczący wpływ ma spływ

podpowierzchniowy, sugeruje, że wapń i sód zawarte w wodach rzecznych wiosną pochodzą głównie z kompleksu sorpcyjnego gleb, a nie z wietrzenia minerałów z poziomu wodonośnego. Odpływ wód glebowo-gruntowych powoduje także bardzo znaczne przemieszczanie azotanów, o czym świadczy przebieg wartości czynnika A w lutym (rys. 4). Na przełomie marca i kwietnia po wysiewie nawozów mineralnych ponownie zwiększa się mineralizacja i stężenie mobilnych jonów w wodzie rzeki (rys. 2, 3, 4).

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Analiza czynnikowa umożliwiła identyfikację czterech głównych procesów kształtujących w skali roku skład chemiczny małego cieku w krajobrazie rolniczym. Wyróżnione czynniki z reguły mają związek ze stanami i przepływami wód. Czynniki A ma największe znaczenie w trakcie wezbrań wiosennych i wiąże się z intensywnym wymywaniem z gleb łatwo rozpuszczalnych jonów, głównie azotanów, których stężenie osiąga w tym okresie maksimum. Podczas podwyższonych stanów wód, m.in. w trakcie opadania wiosennej fali wezbraniowej lub po długotrwałych opadach, skład chemiczny cieku jest kształtowany głównie przez spływ podpowierzchniowy wynoszący z obszaru zlewni chlorki, siarczany, sód, potas i wapń (czynnik C). W okresie niżówek na skład chemiczny cieku wpływa przede wszystkim zasilanie przez wody głębokiego krążenia, w których jest duże stężenie sodu, żelaza i magnezu (czynnik D). W tym czasie w warunkach niskiego potencjału redox uwalniane są z osadów dennych mobilne formy fosforu, co powoduje maksymalne ich stężenie (czynnik B).

Analizę czynnikową należy ocenić jako użyteczne narzędzie statystyczne, przydatne zwłaszcza do opracowywania dużych zestawów danych hydrochemicznych. Umożliwia ona syntetyczne opracowanie materiału, składającego się nieraz z setek wyników oznaczeń chemicznych, którego ocena i interpretacja bez zastosowania statystycznych metod wielozmiennych byłaby trudna lub wręcz niemożliwa.

Mimo niewątpliwych zalet, analiza czynnikowa ma swoje ograniczenia. Celem jej stosowania jest upraszczanie i syntetyzowanie wyników oraz wykrywanie faktów najbardziej ogólnych, co w przypadku opracowywania danych hydrochemicznych dotyczących długiego i zróżnicowanego okresu może prowadzić do zatracenia szczegółów istotnych dla pełnego zrozumienia analizowanych procesów. Bardziej precyzyjne uchwycenie procesów hydrochemicznych kształtujących skład chemiczny cieku wymaga wykonywania analizy czynnikowej z podziałem na krótsze okresy, oddzielnie dla poszczególnych stanów charakterystycznych rzeki.

Praca została wykonana w ramach tematu badawczego S/IIŚ/22/02.

LITERATURA

- BROWN V.A., McDONNELL J.J., BURNS D.A., KENDALL C., 1999. The role of event water, a rapid shallow flow component, and catchment size in summer stormflow. *J. Hydrol.* 217 s. 171–190.
- CHILD D., 1970. *The essentials of factor analysis.* London: Holt, Rinehart and Winston ss. 170.
- EVANS C.D., DAVIES T.D., WINGTON JR P.J., TRANTER M., KRETSCHER W.A., 1996. Use of factor analysis to investigate processes controlling the chemical composition of four streams in Adirondack Mountains, New York. *J. Hydrol.* 185 s. 297–316.
- GRODZIŃSKA K., 1993. Badania ekologiczne w leśnej zlewni Ratanicy (Pogórze Karpackie). W: Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego w Polsce. Wybrane problemy. Pr. zbior. Red. A. Kostrzewski. *Bibl. Monitoringu Środ.* s. 128–137.
- HAAG D., KAUPENJOHANN M., 2001. Landscape fate of nitrate fluxes and emissions in Central Europe. A critical review of concepts, data, and models for transport and retention. *Agric. Ecosyst. Environ.* 86 ss. 21.
- HEATHWAITE A.L., DILS R.M., 2000. Characterising phosphorus loss in surface and subsurface hydrological pathways. *Sci. Total Environ.* 251/252 s. 523–538.
- ISERMANN K., ISERMANN R., 1997. Globale, territoriale und betriebliche Nährstoffbilanzierung. W: Umweltbundesamt (Red.) *Stoffbilanzierung in der Landwirtschaft.* Vol. 20. Wien: Umweltbundesamt s. 241–313.
- JOBSON J.D., 1991. *Applied multivariate analysis.* Vol. 1. Regression and experimental design. New York: Springer ss. 650.
- KOSTRZEWSKI A., MAZUREK M., ZWOLIŃSKI Z., 1994. Dynamika transportu fluwialnego górnej Parsęty. Poznań: Stow. Geomorfologów Pol. s. 165.
- LINDBERG S. E., HARRISS R.C., HOFFMAN W.A., LOVETT G.M. TURNER R.R., 1989. Atmospheric chemistry, deposition, and canopy interactions. W: *Analysis of biogeochemical cycling processes in Walker Branch watershed.* Pr. zbior. Red. D.W. Johnson i R.I. van Hook. New York: Springer-Verlag s. 96–163.
- LINDBERG S.E., LOVETT G.M., RICHTER D.D., JOHNSON D.W., 1985. A two-year comparison of bulk and set/dry flux measurements above and below a forest canopy. *Ann. Meet. Nat. Atmos. Deposit. Program, Fort Collins, Colorado* ss. 30.
- MACIOSZCZYK A., DOBRZYŃSKI D., 2002. *Hydrogeochemia strefy aktywnej wymiany wód podziemnych.* Warszawa: PWN ss. 448.
- MORRISON D.F., 1990. *Wielowymiarowa analiza statystyczna.* Warszawa: PWN ss. 589.
- PETRY J., SOULSBY C., MALCOLM I.A., YOUNGSTON A.F., 2002. Hydrological controls on nutrient concentrations and fluxes in agricultural catchments. *Sci. Total Environ.* 294 s. 95–110.
- PIONKE H.B., GBUREK W.J., SHARPLEY A.N., SCHNABEL R.R., 1996. Flow and nutrient export patterns for an agricultural hill-land watershed. *Water Resour. Res.* 32 6 s. 1795–1804.
- PUCKETT L.J., BRICKER O.P., 1992. Factors controlling the major ion chemistry of streams in the Blue Ridge Valley and physiographic provinces of Virginia and Maryland. *Hydrol. Proces.* 6 s. 79–98.
- RACINE J.B., REYMOND H., 1977. *Analiza ilościowa w geografii.* Warszawa: PWN ss. 254.
- REEDER S.W., HITCHON B., LEVINSON A.A., 1972. Hydrochemistry of the surface waters of the Mackenzie River drainage basin, Canada. Cz. 1. Factors controlling inorganic composition. *Geochim. Cosmochim. Acta* 36 s. 825–865.
- WITKOWSKI D., 1997. Wybrane czynniki kształtujące jakość wód powierzchniowych w małych zlewniach nizinnych. *Rocz. Gleb.* 47 3/4 s. 5–21.

Piotr BANASZUK

**THE USE OF FACTOR ANALYSIS TO IDENTIFY PROCESSES CONTROLLING
CHEMICAL COMPOSITION OF A SMALL STREAM IN RURAL AREA**

Key words: factor analysis, ion migration, nitrates, surface waters

S u m m a r y

Factor analysis (FA) was used to identify interrelationships between dissolved species in the small river discharge and to determine physical processes controlling their behavior. Through the analysis of the whole dataset I was able to identify the dominant processes that appear to cause variation in stream chemical composition. Analysis of the whole dataset distinguished 4 main factors, which together explained 85 % of the total variance in the dataset. Factor A, which explains the largest proportion of variance was associated with processes that occur in an episodic time scale: washout of highly soluble ions, mainly NO_3^- and SO_4^{2-} during winter-snowmelt episode. Translocation of Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} to stream water is caused predominantly by subsurface outflow from the watershed and leaching of soils during high water stages in spring and autumn (factor C). During base-flow, stream water supplied from the deeper flow paths is enriched with SiO_3^{2-} , Mg^{2+} , $\text{Fe}^{2+/3+}$ and Na^+ (factor D). At the same time low redox potential in water leads to phosphorus and iron release from organic and inorganic complexes accumulated in bottom sediments of the stream (factor B).

For detailed inspection of hydrochemical processes occurring in a seasonal or episodic timescale it is necessary to run FA on subsamples representing particular hydrological seasons.

Recenzenci:

prof. dr hab. Barbara Sapek

prof. dr hab. Zdzisław Zabłocki

Praca wpłynęła do Redakcji 19.12.2003 r.

