

Zastosowanie analizy czynnikowej w celu określenia antropogenicznych przemian jakości wód podziemnych

Krzysztof Dragon*

An application of factor analysis for determination of anthropogenic changes in ground water quality. Prz. Geol., 50: 127–131.

Summary. The paper presents the possible application of factor analysis in identification of hydrogeochemical variations that influence the ground water chemistry. The special attention was paid to the changes of ground water chemistry connected with the influence of anthropogenic contamination. The part of the Wielkopolska Buried Valley Aquifer (between the Obra and Warta Rivers) was the objective of the present study. The results of the factor analysis confirm earlier findings concerning anthropogenic contamination of ground water in this aquifer.

Key words: factor analysis, ground water contamination, Wielkopolska Buried Valley Aquifer

Analiza czynnikowa jest metodą szeroko stosowaną w zagadnieniach hydrogeologicznych. Liczne opracowania wskazują przydatność tej metody w celu wyjaśnienia procesów hydrogeochemicznych (Jayakumar & Siraz, 1997; Ruiz i in., 1990; Hitchon i in., 1971). Usunoff i Guzman-Guzman (1989) wykazują zalety tej metody wynikające m.in. możliwości interpretacji wskaźników fizycznych (np. temperatura), chemicznych (np. rozpuszczone składniki), a także czynników środowiskowych (np. miąższość słabo przepuszczalnego nadkładu). Procedura analizy czynnikowej jest również z powodzeniem stosowana w celu określenia antropogenicznych przemian chemizmu wód (Abu-Jaber i in., 1997; Grande i in., 1996). Metoda ta może być stosowana również do interpretacji procesów hydrogeochemicznych w przypadku, gdy dysponujemy małą liczbą danych (Melloul, 1995; Ghodeif i in., 1999).

Analiza czynnikowa znalazła również zastosowanie wśród polskich badaczy. Pawuła (1975) zastosował analizę czynnikową do wstępnej identyfikacji procesów hydrochemicznych, kształtujących chemizm wód podziemnych kenozoiku w środkowej Wielkopolsce, Liszkowska (1995) zastosowała opisaną procedurę w celu wyjaśnienia genezy chemizmu wód podziemnych Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Labus (1999) metodę wyżej wymienioną analizy zastosował do identyfikacji ognisk zanieczyszczeń metalami ciężkimi wód powierzchniowych i podziemnych zlewni Białej Przemszy, natomiast Macioszczyk (1975) wskazała możliwość wykorzystania wyżej wymienionej metody w regionalnych badaniach hydrochemicznych. Opisane wyżej prace zawężyły się do wydzielenia charakterystycznych dla analizowanego zbioru czynników i ich procentowego udziału w całkowitej zmienności. Wynikiem analizy czynnikowej prezentowanym w artykule jest przede wszystkim:

— oszacowanie procentowego udziału czynnika antropogenicznego w kształtowaniu chemizmu wód podziemnych,

— określenie kierunku antropogenicznych przemian jakości wód podziemnych,

— wydzielenie populacji wód zanieczyszczonych antropogenicznie,

— określenie obszarów najbardziej intensywnego zanieczyszczenia wód.

Interpretację wyników badań prezentowaną w artykule zawężono do wyjaśnienia antropogenicznych przemian

chemizmu wód podziemnych. Otrzymane wyniki badań dają też szerokie możliwości interpretacyjne w celu identyfikacji naturalnych procesów kształtujących chemizm wód podziemnych.

Metodyka badań

Procedura analizy czynnikowej. Głównym celem analizy czynnikowej jest wydzielenie z populacji danych wyjściowych (opisujących np. chemizm wód podziemnych danego poziomu wodonośnego) grup parametrów ściśle ze sobą skorelowanych, które nazywamy czynnikami. Czynniki te obrazują zmienność badanego zbioru. Procedura analizy czynnikowej jest przedstawiona szczegółowo w pracach Browna (1998) i Drevera (1997). Obliczeń analizy czynnikowej dokonano przy pomocy programu *Statistica*. Tok obliczeń był następujący:

1) w pierwszej kolejności dane wyjściowe (zmienne) poddano standaryzacji według poniższego wzoru:

$$z_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}}{s_i} \quad [1]$$

gdzie:

X_{ij} — wartość zmiennej i w o punkcie j (np. stężenie składnika i w studni j),

\bar{X} — średnia arytmetyczna zmiennej i ,

s_i — odchylenie standardowe zmiennej i .

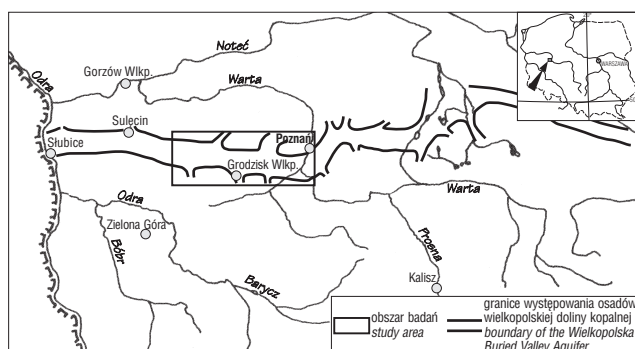
W wyniku powyższej procedury odchylenie standardowe (s_i) tak przekształconej zmiennej wynosi 1, zaś średnia arytmetyczna (\bar{X}) wynosi 0. Dzięki tej transformacji możliwa jest interpretacja zbioru danych oznaczonych w różnych mianach (np. mg/l i mval/l), macierz korelacji może zawierać zarówno oznaczenia chemiczne (stężenie poszczególnych jonów), fizyczne (temperatura, pH, itp.), jak również czynniki środowiskowe (np. głębokość studni, miąższość nadkładu, itp.),

2) dane poddano następnie transformacji, w celu wyodrębnienia czynników (tu: zastosowano procedurę składowych głównych — StatSoft, Inc., 1995). Analizowane zmienne mają postać:

$$z_{ij} = L_{i1}f_{1j} + L_{i2}f_{2j} + L_{iN}f_{Nj} + e_{ij} = \sum_k^N L_{ik}f_{kj} + e_{ij} \quad [2]$$

gdzie: $f_{1j}, f_{2j}, \dots, f_{Nj}$ są to otrzymane czynniki opisujące zmienną z , e_{ij} jest to natomiast część wariancji zmiennej nie opisywana przez otrzymane czynniki (tzw. wartość swoista — Dąbrowski, 2000). Pierwszy czynnik tłumaczy największą część wariancji, każdy następny coraz to mniejszą. L_{ik} nosi nazwę ładunku czynnikowego zmiennej i w czynniku

*Instytut Geologii, Uniwersytet im. A. Mickiewicza
ul. Maków Polnych 16, 61-686 Poznań; smok@amu.edu.pl



Ryc. 1. Szkic sytuacyjny obszaru badań
Fig. 1. Location scheme of study area

k. Jego wartość mówi, w jakim stopniu poszczególne czynniki opisują zmienną z (np. stężenie jonu). Innymi słowy parametr ten możemy traktować jako współczynnik korelacji pomiędzy zmienną, a analizowanym czynnikiem (przyjmuje on wartości pomiędzy -1 i 1),

3) w celu uzyskania przejrzystego układu ładunków dane poddano tzw. rotacji. Najbardziej powszechną strategią rotacji jest metoda *varimax*. W wyniku tej operacji uzyskujemy wysokie wartości czynnikowe (bliskie 1 lub -1) dla jednych zmiennych (skorelowanych w czynniku), przy wartościach bliskich 0 dla pozostałych,

4) następnie dla poszczególnych czynników w całkowitej zmienności analizowanego zbioru obliczono procentowy ich udział. Otrzymane czynniki nie opisują jednak całkowitej zmienności analizowanych przez nas cech. Pozostała część wariancji może być przypisana czynnikom niemożliwym do interpretacji z powodu np. niekompletności analizowanych przez nas parametrów (Labus, 1999), lub czynnikiem losowym (losowy „szum”).

W celu określenia liczby czynników zastosowano kryterium osypiska (StatSoft, Inc., 1995). Dzięki temu do interpretacji przyjęto tylko te czynniki, które w największej części opisują zmienność analizowanego zbioru i dają się sensownie interpretować.

O tym, w jakim stopniu wydzielone czynniki opisują zmienność badanej cechy mówi tzw. zmienność wspólna V (Dąbrowski, 2000), która jest równa sumie kwadratów ładunków czynnikowych,

$$V = \sum_k^N (L_{ik})^2 \quad [3]$$

5) dla tak przeliczonych danych wyjściowych obliczono wartości czynnikowe. Jako, że dane wyjściowe były standaryzowane, wartości czynnikowe mają taką samą postać (tzn. $s_i=1$; $\bar{X}=0$). Jayakumar i Siraz (1997) wskazali, że wartości czynnikowe (dla poszczególnych opróbowanych punktów) są ściśle zależne od intensywności chemicznego procesu opisywanego przez czynnik.

W artykule wartości czynnikowe przedstawiono na wykresach rozrzutu, a następnie za pomocą interpolacji przedstawiono na mapach. Obszary o najwyższych wartościach czynnikowych (>1) są odbiciem intensywności oddziaływania procesu opisywanego przez czynnik, wartości ekstremalnie niskie (<-1) odzwierciedlają obszary, gdzie dany proces nie ma miejsca, natomiast wartości bliskie 0 odzwierciedlają średnią intensywność oddziaływania procesu,

6) wynik analizy czynnikowej jest najbardziej czytelny, gdy liczba czynników (N) jest mała, zmienność wspólna

V wysoka (jak najbliższa 1), a otrzymane czynniki dają się czytelnie interpretować przyrodniczym procesem (Drever, 1997). Dla przykładu — parametry fizyczno-chemiczne wód skorelowane w czynniku dadzą się wyjaśnić za pomocą procesu (antropogenicznego lub geogenicznego), który mógł doprowadzić do obserwowanej zmienności.

Charakterystyka obszaru badań i wykorzystanych materiałów

Charakterystyka hydrogeologiczna obszaru badań. Do badań wpływu antropopresji na chemizm wód podziemnych wytypowano zachodni odcinek wielkopolskiej doliny kopalnej (wdk). Struktura ta należy do największych zbiorników wodonośnych środkowej Wielkopolski (Dąbrowski, 1990).

Wytypowany do badań fragment wdk (ryc. 1) charakteryzuje się zróżnicowaniem naturalnych warunków ochrony, intensywną eksploatacją oraz zróżnicowaniem naturalnych czynników kształtujących chemizm wód podziemnych, związanych przede wszystkim ze zmiennością litologii i warunków krążenia wód (Górski, 1989). Obszar ten znajduje się pod typową dla środkowej Wielkopolski presją, związaną z występowaniem obszarowych ognisk zanieczyszczeń, jakimi są przede wszystkim nieskanalizowana zabudowa miejska i wiejska oraz obszary rolnicze.

Osady wodonośne wdk mają miąższość od kilkunastu do prawie 50 m, i są to w przewadze piaski, pospółki i żwiiry, w spągu izolowane serią trzeciorzędowych ilów poznańskich od niżej ległych osadów wodonośnych piętra trzeciorzędowego. Nadkład wdk stanowią słabo przepuszczalne gliny zwałowe, stanowiące naturalną ochronę dla przenikania zanieczyszczeń z powierzchni terenu. W rejonach wysoczyznowych miąższość tych glin przekracza 50 m. Znacznie mniejsza miąższość słabo przepuszczalnego nadkładu (często poniżej 20 m) występuje w rejonach występowania międzyglinowych poziomów wodonośnych (związanych z występowaniem sandrów kopalnych, ozów i piaszczystych utworów zwałowych) oraz w rejonach rynien glacialnych. W rejonie doliny Warty brak jest słabo przepuszczalnego nadkładu.

Obszarem zasilania omawianego odcinka wdk jest rejon Wału Lwówecko-Rakoniewickiego, skąd formują się strumienie wód podziemnych drenowane na zachodzie przez rzekę Obrę, a na wschodzie przez rzekę Wartę. Poziom wodonośny doliny kopalnej jest zasilany przez przesączanie się wód poprzez gliny zwałowe oraz poprzez wyżej ległe poziomy międzyglinowe. W rejonie doliny Warty znaczenie w zasilaniu wdk ma też drenaż wód z piętra trzeciorzędowego.

rodła wykorzystanych materiałów. W statystycznej analizie wykorzystano zbiór aktualnych danych hydrochemicznych, uzyskanych w wyniku jednoczesnego opróbowania hydrochemicznego wód podziemnych, wykonanego latem 2000 r., w ramach projektu badawczego nr 9T12B00918 finansowanego przez KBN. Szczegóły dotyczące opróbowania przedstawiono w artykule Dragona (2001). Zbiór danych aktualnych porównano następnie z analizami chemizmu wód dla tych samych punktów, wykonanymi w okresie budowy studni (z lat 1957-1998), co pozwoliło określić kierunki przemian chemizmu wód w trakcie eksploatacji studni.

Analiza czynnikowa nie powinna być wykonywana dla zmiennych, które charakteryzują się silną współzależno-

ścią (Brown 1998, Dąbrowski, 2000), czy zmiennych opisujących tą samą cechę w różnych mianach (mamy wtedy do czynienia z silną współzależnością, powodującą nadmiarowość opisu, np. przewodnictwo i mineralizacja). Mając powyższe na uwadze do analizy czynnikowej włączono następujące zmienne: odczyn (pH), barwa, ChZT, azot amonowy, chlorki, siarczany, żelazo ogólne, mangan, potas, sód oraz twardość ogólną i suchą pozostałość.

Wyniki badań

Podstawowe parametry statystyczne wybranych wskaźników hydrochemicznych wód podziemnych poziomu wielkopolskiej doliny kopalnej na podstawie opróbowania wykonanego latem 2000 r. prezentuje tabela 1.

Wyniki analizy czynnikowej prezentuje tabela 2. Z analizy czynnikowej wyłączono azot azotanowy, gdyż poza dwoma przykładami lokalnego zanieczyszczenia, stężenia tego parametru nie przekraczają 0,1 mg/l. Z obliczeń wyłączono też dwie analizy chemiczne o skrajnie wysokich, znacznie wyższych od pozostałej części zbioru stężeniach poszczególnych składników wody, które zbyt mocno wpływały na wynik analizy czynnikowej.

W wyniku obliczeń otrzymano 4 czynniki, wyczerpujące w 73,6% zmienność analizowanej populacji. Ich interpretacja jest następująca. Czynniki 1 charakteryzuje się najwyższymi ładunkami czynnikowymi chlorków i siarczanów, przy dość wysokich ładunkach twardości og. i suchej pozostałości oraz sodu i niskich ładunkach czynnikowych pozostałych parametrów. Wysoki, ujemny ładunek ma jednocześnie miąższość słabo przepuszczalnego nadkładu. Ryc. 2 przedstawia wykres ładunków czynnikowych 2 pierwszych czynników. Wskaźniki zanieczyszczeń wód (chlorki i siarczany) grupują się w pobliżu osi czynnika 1, a więc przy bardzo małym udziale w czynniku 2. Również twardość ogólna wody i sucha pozostałość grupują się na wykresie w tym samym polu, biorąc jednak również udział w czynniku 2.

Procesem, który prowadzi do takiej zmienności jest niewątpliwie wpływ antropopresji, gdyż wszystkie te parametry charakteryzują się wzrostem stężeń w trakcie eksploatacji studni (Górski, 1989; Dragon, 1999). Czynniki ten można zatem nazwać „antropogenicznym”. Jest on odpowiedzialny w 42 % za analizowaną zmienność populacji.

Potwierdzeniem tej obserwacji są wyniki analizy czynnikowej wykonanej dla populacji wód (wydzielonej na podstawie danych literaturowych — Górski, 1989), o chemizmie uznanym za naturalny (tab. 2). Podstawowe wskaźniki zanieczyszczeń (chlorki i siarczany) biorą udział w II czynniku, charakteryzując się zaledwie 14,4% udziałem (dokumentując jednak pewien wpływ antropopresji również w tym zbiorze danych).

Czynniki 2, 3 i 4 (analiza dla całego zbioru danych) odzwierciedlają geogeniczne procesy, kształtujące chemizm wód podziemnych. Najwyższymi ładunkami czynnikowymi charakteryzują się bowiem parametry odzwierciedlające naturalne procesy hydrogeochemiczne. Czynniki te nazwano zatem „geogenicznymi”. W przypadku analizy dla populacji wód o „naturalnym” składzie chemicznym parametry te grupują się w czynniku I, charakteryzując się 40,5% udziałem.

Wysoki udział suchej pozostałości i twardości ogólnej w czynniku 2 („geogenicznym”) może odzwierciedlać obserwowane zróżnicowanie przestrzenne stężeń tych parametrów. Dużo niższe ich stężenia obserwuje się bowiem w strefie zasilania wdk (rejon Wału Lwówecko-Rakoniewickiego).

Ryc. 3 przedstawia wykres wartości czynnikowych dla poszczególnych studni ujmujących wody wdk, opróbowanych latem 2000 r. Dla lepszej czytelności wykresu zrezygnowano z opisu poszczególnych punktów. Punkty, które mają wartości czynnikowe >1 dla czynnika 1 charakteryzują się znacznym przekształceniem chemizmu wody, odzwierciedlającym się podwyższonymi stężeniami (w stosunku do naturalnego tła hydrochemicznego) podstawowych wskaźników zanieczyszczeń wód: chlorków i siarczanów, a także twardości ogólnej wody i suchej pozostałości. Punkty o ekstremalnie wysokich wartościach

czynnikowych (>2) charakteryzują się stężeniami chlorków >80 mg/l, siarczanów >130 mg/l. Wzrastające wartości czynnikowe tego czynnika wskazują kierunek antropogenicznych przemian chemizmu wody (kierunek antropopresji oznaczono strzałką).

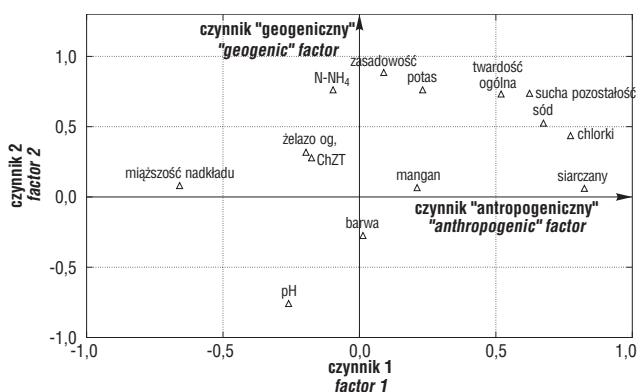
Wielkość wartości czynnikowych można zatem traktować jako wskaźnik antropogenicznego zanieczyszczenia wód podziemnych. Wielkość tego parametru może też być pomocna przy wydzieleniu zbioru wód antropogenicznie zanieczyszczonych. Punkty charakteryzujące najwyższe wartości czynnikowe czynnika 2, zlokalizowane są natomiast w górnej części wykresu. Z ogólnego rozpoznania chemizmu wód wdk wynika, że stężenia parametrów grupujących się w tym czynniku rosną wraz oddalaniem się od strefy zasilania. Potwierdza to analiza wykresu (ryc. 3). Punkty o najwyższych wartościach czynnikowych tego czynnika (>1) znajdują się bowiem w strefie drenażu bądź przepływu. Dla strefy zasilania są

Tab. 1. Charakterystyka statystyczna wybranych parametrów hydrochemicznych wód poziomu wielkopolskiej doliny kopalnej

Table 1. Statistical characteristic of some hydrochemical parameters of the Wielkopolska Buried Valley Aquifer

Wskaźnik	Miano	Min.	Max.	Średnia	Mediana
Barwa	[mg Pt/l]	0	80	25	20
Odczyn	[pH]	7,10	8,28	7,58	7,56
Utlonialność	[mg O ₂ /l]	1,3	7,0	3,1	2,9
Przewodnictwo	[mS/cm]	255	1085	566	546
Twardość og.	[mval/l]	2,8	10,7	5,8	5,7
Zasadowość	[mval/l]	2,0	6,9	4,9	5,0
Sucha pozostałość	[mg/l]	179	672	383	368
Chlorki	[mg/l]	7	84	23	14
Siarczany	[mg/l]	0	175	42	32
N-NO ₃	[mg/l]	0	10,0	0,21	0,1
N-NH ₄	[mg/l]	0	0,6	0,16	0,14
Żelazo og.	[mg/l]	0,05	13,1	4,2	3,9
Mangan	[mg/l]	0	0,42	0,18	0,15
Wapń	[mg/l]	36,0	167	90,4	85,5
Magnez	[mg/l]	4,3	29,1	15,6	16,1
Sód	[mg/l]	6,5	66	13,3	10,5
Potas	[mg/l]	0,8	20,2	3,2	3,0

liczebność zbioru n=59



Ryc. 2. Wykres analizy czynnikowej zmiennych środowiska hydrochemicznego wielkopolskiej doliny kopalnej (na podstawie aktualnych danych hydrochemicznych)

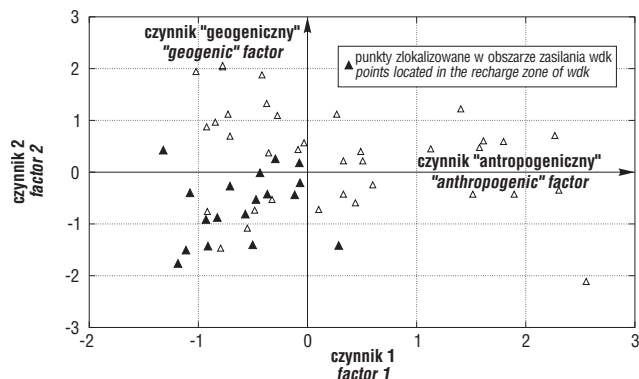
Fig. 2. Factor analysis of hydrochemical parameters of the Wielkopolska Buried Valley Aquifer (based on current data)

natomiast charakterystyczne wartości czynnikowe <0 (zaciemnione punkty na wykresie).

Przestrzenny rozkład wartości czynnikowych czynnika 1 przedstawia mapa — ryc. 4. Wartości czynnikowe >0 występują w rejonach o podwyższonych stężeniach wskaźników zanieczyszczeń.

Najwyższe wartości czynnikowe czynnika 1 występują dokładnie w tych samych rejonach, gdzie zaobserwowano największy wzrost stężeń chlorków w trakcie eksploatacji. W rejonach tych naturalne tło hydrochemiczne (wyznaczone na podstawie archiwalnych analiz wody) w okresie budowy studni nie przekraczało 20 mg/l. W chwili obecnej stężenia chlorków w tych rejonach dochodzą nawet do 80 mg/l.

W celu określenia kierunku przemian chemizmu wód podziemnych poziomu wdk w trakcie eksploatacji studni przeprowadzono również analizę czynnikową dla zbioru



Ryc. 3. Wartości czynnikowe opróbowanych punktów poziomu wielkopolskiej doliny kopalnej (zaciemnione punkty zlokalizowane są w obszarze zasilania wdk)

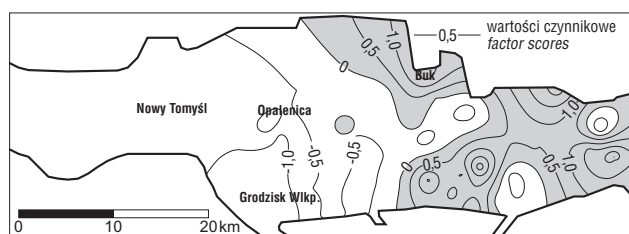
Fig. 3. Factor scores of sampling sites of the Wielkopolska Buried Valley Aquifer (filled points are located in the recharge zone of wdk)

analiz archiwalnych (z lat 1957–1998), dla tych samych punktów. Wydzielono 2 czynniki, które w 53% opisują zmienność zbioru. W obu czynnikach otrzymano bardzo podobną strukturę macierzy, w obu korelują się te same parametry co w zbiorze danych aktualnych. Jednak w zbiorze danych archiwalnych czynnik „antropogeniczny” charakteryzuje się dużo mniejszym udziałem w kształtowaniu całkowitej zmienności, wyczerpuje on bowiem 32% zmienności. Czynniki „geogeniczny” charakteryzuje się natomiast 22% udziałem. Dane te potwierdzają, sygnalizowaną wcześniej (Górski, 1989; Dragon, 1999), stałą tendencję pogarszania się jakości wód podziemnych poziomu wdk w wyniku zanieczyszczenia antropogenicznego. Dość duży udział czynnika antropogenicznego w okresie budo-

Tab. 2. Wyniki analizy czynnikowej (ładunki czynnikowe po rotacji varimax) zmiennych hydrochemicznych środowiska wielkopolskiej doliny kopalnej

Table 2. Factor analysis of hydrochemical variables (after varimax rotation) of the Wielkopolska Buried Valley Aquifer

Parametry	Cały zbiór danych					Populacja wód o składzie chemicznym uznanym za naturalny	
	Czynnik 1	Czynnik 2	Czynnik 3	Czynnik 4	Zmienność wspólna (V)	Czynnik I	Czynnik II
Miąszość nadkładu	-0,66	0,08	-0,40	-0,20	0,64	0,13	0,62
Odczyn (ph)	-0,26	-0,76	-0,25	0,07	0,71	-0,84	0,02
Barwa	-0,01	0,27	-0,19	0,84	0,81	0,13	-0,69
Utlenialność	-0,18	0,28	0,27	0,62	0,57	0,35	-0,12
N-NH4	-0,10	0,76	0,18	0,00	0,62	0,73	0,02
Siarczany	0,82	0,06	-0,03	-0,34	0,79	-0,34	0,67
Chlorki	0,77	0,44	-0,21	0,02	0,83	0,21	0,43
Zasadowość	0,09	0,89	0,27	0,01	0,87	0,97	0,05
Żelazo og.	-0,20	0,32	0,67	-0,03	0,59	0,64	-0,24
Mangan	0,21	0,07	0,77	0,03	0,64	0,32	-0,12
Potas	0,23	0,76	-0,15	0,06	0,66	0,83	0,01
Sód	0,68	0,53	0,07	-0,06	0,75	0,58	-0,47
Twardość og.	0,52	0,73	0,16	-0,18	0,86	0,90	0,34
Sucha pozostałość	0,62	0,74	0,05	-0,09	0,94	0,91	0,30
Udział [%]	41,9	14,5	8,8	8,4		40,5	14,4



Ryc. 4. Wartości czynnikowe czynnika 1 w poziomie wielkopolskiej doliny kopalnej. Zaciemniono obszar występowania wartości czynnikowych >0

Fig. 4. Factor score contours (factor 1) in the Wielkopolska Buried Valley Aquifer

wy studni (przed włączeniem studni do eksploatacji) wskazuje na obecność tego czynnika już w tym okresie.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania analizy czynnikowej, w celu rozpoznania wpływu zanieczyszczeń antropogenicznych na kształtowanie chemizmu wód podziemnych. Jako obiekt badań wytypowano „zachodni” fragment wielkopolskiej doliny kopalnej (pomiędzy rzekami Obrą i Wartą), który charakteryzuje się zróżnicowaniem warunków naturalnej ochrony (w postaci słabo przepuszczalnego nadkładu) oraz intensywną eksploatacją (szczególnie w obszarach zabudowy miejskiej). W celu interpretacji wykorzystano wyniki aktualnego (wykonanego latem 2000 r.) rozpoznania hydrochemicznego.

Wyniki analizy czynnikowej potwierdzają sygnalizowane wcześniej przejawy zanieczyszczenia antropogenicznego wód. Czynniki antropogeniczne w 42% bierze udział w przekształceniach jakości wód podziemnych. Mniejszy udział tego czynnika obserwuje się w zbiorze analiz archiwalnych (z okresu budowy studni), co wskazuje na nasilenie się antropopresji w trakcie eksploatacji studni. Wpływy antropogeniczne przejawiają się przede wszystkim wzrostem stężeń podstawowych wskaźników zanieczyszczeń: chlorków i siarczanów, ale również suchej pozostałości i twardości ogólnej wody. Te bowiem parametry biorą największy udział w czynniku 1 (czynnik „antropogeniczny”), charakteryzując się najwyższymi ładunkami czynnikowymi. Na podstawie wartości czynnikowych (czynnika „antropogenicznego”) wydzielono obszary o najsilniejszych przekształceniach antropogenicznych chemizmu wody. Obszary te pokrywają się z obszarami występowania chlorków (odzwierciedlających wpływy antropogeniczne już na niskim poziomie antropopresji) w stężeniach podwyższonych w stosunku do naturalnego tła hydrochemicznego (>20 mg/l). Wskazano też przydatność wartości czynnikowych w celu określenia stopnia antropogenicznych przemian chemizmu wody. Wody najsilniej zanieczyszczone charakteryzują się najwyższymi (>2) wartościami tego parametru.

Przedstawione w artykule wyniki badań wskazują przydatność analizy czynnikowej dla określenia antropogenicznych przemian jakości wód podziemnych, określenia procentowego udziału antropopresji w kształtowaniu się jakości wód oraz wydzielenia obszarów o najsilniej-

szych wpływach antropogenicznych. Interpretację analizy czynnikowej prezentowaną w artykule zawężono do antropogenicznych przemian chemizmu wód podziemnych. Metoda ta daje również szerokie możliwości interpretacyjne dla identyfikacji naturalnych procesów kształtujących chemizm wód.

Autor pragnie podziękować Panu prof. dr hab. Józefowi Górskiemu za dyskusje oraz pomoc w przygotowaniu artykułu, jak również Pani dr Ewie Liszkowskiej za cenne dyskusje oraz krytyczne uwagi.

Literatura

- ABU-JABER N.S., ALOOSY A.S. & JAWARD A. 1997 — Determination of aquifer susceptibility to pollution using statistical analysis. *Environm. Geol.*, 31: 94–106.
- BROWN C.E. 1998 — Applied multivariate statistics in geohydrology and related sciences. Springer-Verlag Berlin.
- DĄBROWSKI J. 2000 — O problemie redukcji wymiarów. *Pol. Tow. Inż. Roln.*, Kraków.
- DĄBROWSKI S. 1990 — Hydrogeologia i warunki ochrony wód podziemnych Wielkopolskiej Doliny Kopalnej. Wyd. SGGW-AR, Warszawa.
- DRAGON K. 1999 — Wpływ antropopresji na chemizm wód podziemnych wielkopolskiej doliny kopalnej między Obrą a Wartą. *Współ. Probl. Hydrogeol.*, 9, S. Krajewski, A. Sadurski (eds.), Warszawa–Kielce: 37–42.
- DRAGON K. 2001 — Przemiany antropogeniczne chemizmu wód podziemnych poziomu wielkopolskiej doliny kopalnej (obszar między Obrą a Wartą) w świetle aktualnych danych hydrochemicznych. *Współ. Probl. Hydrogeol.*, 10: 27–34, Wrocław–Krzyżowa.
- DREVER J.I. 1997 — The geochemistry of natural waters. Surface and ground water environments. Prentice Hall Upper Saddle River, New Jersey 07458.
- GHODEIF K., DRAGON K. & GÓRSKI J. 1999 — Ground water quality in the Arabian-Nubian shield, Mount Sinai, Egypt. *Geologos*, 4: 29–46.
- GÓRSKI J. 1989 — Główne problemy chemizmu wód podziemnych utworów kenozoiku środkowej Wielkopolski. *Zesz. Nauk. AGH, Geologia* 45, Kraków: 1–114.
- GRANDE J.A., GONZALEZ A., BELTARAN R. & SANCHEZ-RODAS D. 1996 — Application of Factor Analysis to the study of contamination in the aquifer system of Ayamonte-Huelva (Spain). *Ground Water*, 34: 155–161.
- HITCHON B., BILLINGS G.K. & KLOVAN J.E. 1971 — Geochemistry and origin of formation waters in the western Canada sedimentary basin — III. Factors controlling chemical composition. *Geochem. Cosmochem. Acta*, 35: 567–598.
- JAYAKUMAR R. & SIRAZ L. 1997 — Factor analysis in hydrogeochemistry of coastal aquifers — a preliminary study. *Environm. Geol.*, 31: 174–177.
- LABUS K. 1999 — Stopień zanieczyszczenia i identyfikacja zanieczyszczeń kadmem, ołowiem i cynkiem wód powierzchniowych i podziemnych zlewni Białej Przemszy. *Wyd. Inst. Gosp. Surow. Miner. Ener. PAN, Pr. Geol.*, 146, Kraków.
- LISZKOWSKA E. 1995 — Analiza czynnikowa jako obiektywna metoda określania genezy składu chemicznego oraz zanieczyszczeń wód podziemnych. *Współ. Probl. Hydrogeol.*, 7, Krynica: 329–336.
- MACIOSZCZYK A. 1975 — Zastosowanie analizy czynnikowej 1 sposób R do interpretacji danych hydrogeochemicznych. *Biul. Geol., UW*, 20: 47–68.
- MELLOUL A. 1995 — Use of principal components analysis for studying deep aquifers with scarce data- Application to the Nubian sandstone aquifer, Egypt and Israel. *Hydrogeol. Jour.*, 3: 19–39.
- PAWUŁA A. 1975 — Chemizm wód podziemnych kenozoiku środkowej Wielkopolski. *Arch. Zakł. Hydrogeol. Ochr. Wód Inst. Geol. UAM Poznań*.
- RUIZ F., GOMIS V. & BLASCO P. 1990 — Application of factor analysis to the hydrogeochemical study of a coastal aquifer. *Jour. Hydrology*, 119: 169–177.
- StatSoft, Inc. 1995 — Statistica for Windows. Dokumentacja programu. Tulsa, USA.
- USUNOFF E.J. & GUZAN-GUZAN A. 1989 — Multivariate analysis in hydrochemistry: an example of the use of factor and correspondence analysis. *Ground Water*, 27: 27–34.