

## Zastosowanie analizy czynnikowej w badaniach hydrochemicznych wybranych zlewni sudeckich

Magdalena Modelska\*, Sebastian Buczyński\*



M. Modelska



S. Buczyński

**Application of factor analysis in hydrochemical research of selected Sudety Mts catchments.** *Prz. Geol.*, 55: 319–323.

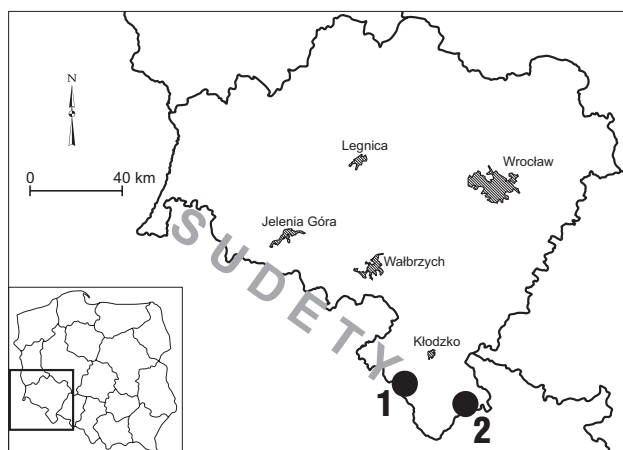
*S u m m a r y .* The statistical principal components factor analysis have been carried out in 2002 and 2003 for groundwater and surface water of two small crystalline massifs of the Sudety Mts. (SW Poland), represented by Kamienica (Śnieżnik Massif) and Mała Bystrzyca (Bystrzyckie Mountains) river catchments. 12 chemical standardized parameters (pH, electrical conductivity, total hardness, concentrations of  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  and  $SiO_2$  (from 7 and 6 sampling series) have been used in the factor analysis transformation. The results indicate that in the Kamienica and Mała Bystrzyca river catchments: 1) concentrations of  $Cl^-$  and  $NO_3^-$  ions (10% of the chemical diversity) are controlled mainly by precipitation; 2) concentrations of  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$  and  $SiO_2$  (from 28 to 46% of chemical diversity) are controlled by the local system of water flow (weathering cover zone); and 3) concentrations of  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  and  $Na^+$  (20–39% of chemical diversity) are controlled by transient system of water flow (fractured stone zone). The total mineralization and pH reaction of groundwater and surface water under study is probably also controlled by transient system of water flow. The results show the relative role of particular flow systems in the chemical composition of water. This may be used in research on resources of mountain areas.

**Key words:** factor analysis, chemical composition of waters, systems of water flow

Problemy zawodnienia masywów krystalicznych Sude-tów są przedmiotem dyskusji od wielu lat. Dyskusyjne jest zarówno tempo i zmienność zasilania, jak i drogi przepływu oraz formy drenażu zwykłych wód podziemnych tych obszarów. W metamorfiku Śnieżnika i Gór Bystrzyckich nie można wydzielić typowych warstw wodonośnych. Woda podziemna występuje w tzw. zespołach wodonośców (strefach). Trzy główne strefy to: 1) strefa utworów pokrywowych, 2) spękany masyw skalny oraz 3) strefa uskoków wgłębnych. Strefy te przenikają się wzajemnie, tworząc wspólny system wodonośny, zasilany przez infiltrację wód opadowych (Kryza, 1983; Tomaszewski, 1989; Tarka, 1993).

Wielu badaczy sugeruje szybką wymianę wód w zlewniach zbudowanych ze skał krystalicznych (Kryza, 1988; Tarka, 1993). Tarka (1993) wykazał istotną rolę strefy utworów pokrywowych w przetrzymywaniu wody w systemie wodonośnym i zasilaniu odpływu ze zlewni. Staśko (1996) podkreśla natomiast rolę strefy spękanego masywu skalnego w zasilaniu odpływu ze zlewni i postuluje dłuższy 7–10 letni okres wymiany wód. Prowadzone na tych obszarach badania hydrochemiczne nie przyczyniły się zbytnio do rozwiązania zagadnień dynamicznych. Powodem są intensywne procesy mieszania się wód podziemnych (o niewielkiej zmienności chemicznej) pochodzących z poszczególnych stref przepływu.

Prezentowane w tym artykule badania są próbą włączenia w rozważania hydrodynamiczne badań hydrochemicznych. Zastosowanie statystycznej analizy czynnikowej umożliwiło powiązanie zmienności chemicznej słodkich wód podziemnych i powierzchniowych z wydzielonymi w masywach krystalicznych strefami przepływu wód podziemnych. Pozwoliło to odpowiedzieć na pytanie, jaka jest rola poszczególnych stref w kształtowaniu składu chemicznego wód. Poznanie odpowiedzi na to pytanie jest



**Ryc. 1.** Lokalizacja obszarów badań. 1 — zlewnia Małej Bystrzycy; 2 — zlewnia Kamienicy

**Fig. 1.** Study areas localization. 1 — Mała Bystrzyca River Catchment; 2 — Kamienica River Catchment

pomocne w ocenie roli, jaką pełnią poszczególne strefy przepływu wód w formowaniu zasobów zwykłych wód podziemnych obszarów górskich.

Badania przeprowadzono w dwóch zlewniach górskich: 1) w zlewni Kamienicy, położonej w środkowej części Masywu Śnieżnika oraz 2) zlewni Małej Bystrzycy w Górach Bystrzyckich. Obie zlewnie są położone w południowo-zachodniej Polsce (ryc. 1), na obszarze Sudetów (ziemia kłodzka). W podłożu zlewni występują skały krystaliczne dwóch serii metamorficznych — gnejsowej i łupkowej — charakterystycznych dla budowy geologicznej kopuły orlicko-śnieżnickiej. W zlewni Kamienicy dominują gnejsy, łupki metamorficzne oraz erlany (Don i in., 1990); w zlewni Małej Bystrzycy — paragnejsy, gnejsy oraz łupki łyszczykowe. W obszarze badań zlewni Małej Bystrzycy występują również wschodnie osadów górnej kredy: głównie piaskowce kwarcowo-skalenkowe. Skały krystaliczne obu badanych zlewni są przykryte na całej powierzchni utworami zwietrzelinowymi o różnej miąższości, wykształconymi w

\*Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska, Uniwersytet Wrocławski, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław; mmod@ing.uni.woc.pl

postaci rumoszu, glin stokowych i aluwii rzecznych (Tarka, 1993). Opisywane zlewnie charakteryzują się brakiem ośrodków przemysłowych i rzadką siecią osadniczą. Zagospodarowanie rolnicze tych obszarów sprowadza się do nielicznych pastwisk, głównie w dolnych partiach zlewni (< 700 m n.p.m.).

### Metodyka

Badania hydrochemiczne wód podziemnych i powierzchniowych wykonano w latach 2002–2003. Serie pomiarowe reprezentowały niskie, pośrednie oraz wysokie stany wód. W zlewni Kamienicy badania składu chemicznego wód przeprowadzono w 9 punktach (4 punkty — wody podziemne, 5 punktów — wody powierzchniowe) w 7 seriach pomiarowych, a w zlewni Małej Bystrzycy w 9 punktach (4 punkty — wody podziemne, 5 punktów — wody powierzchniowe) w 6 seriach pomiarowych. Punkty pomiarowe wód podziemnych wyznaczono w sztolni, 18-metrowym otworze badawczym oraz źródle rumoszowym i źródle szczelinowym. Punkty pomiarowe wód powierzchniowych reprezentowały zarówno ciek główny, jak i dopływy. Wszystkie punkty pomiarowe były zlokalizowane w wysokich partiach badanych zlewni, od 520 do 1000 m n.p.m.

Analizy chemiczne zostały wykonane w Laboratorium Hydrochemicznym ING Uniwersytetu Wrocławskiego oraz Uczelnianym Laboratorium Analitycznym Akademii Rolniczej we Wrocławiu, metodami spektrofotometrycznymi, chromatograficznymi oraz spektroskopii ICP AES.

Szczegółową charakterystykę fizykochemiczną badanych wód oraz lokalizację punktów pomiarowych przedstawiono w pracach (Modelska & Staško, 2003; Modelska & Olichwer, 2004; Modelska & Buczyński, 2005).

Do odtworzenia głównych procesów hydrochemicznych w badanych zlewniach zastosowano procedurę analizy czynnikowej metodą głównych składowych. Analiza czynnikowa jest średnio zaawansowaną metodą statystyczną, służącą do wyodrębnienia z macierzy korelacji wielu cech niewielkiej liczby czynników w możliwie pełny sposób opisujących zmienność analizowanej populacji (Liszkowska, 1995; Manly, 1998). Metoda ta pozwala analizować jednocześnie zmienność wszystkich badanych cech wody oraz wyodrębnić w postaci czynników różne źródła dostawy jonów do wód powierzchniowych i podziemnych, a także określić procentowy udział tych źródeł w kształtowaniu składu chemicznego wód (Evans i in., 1996; Drever, 1997; Mazurek, 2000; Dragon, 2002; Farnham i in., 2003).

Analizie czynnikowej poddano 12 standaryzowanych parametrów chemicznych wód, tj. przewodnictwo elektryczne właściwe, odczyn pH, twardość ogólną, stężenia jonów:  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  oraz  $\text{SiO}_2$ . Celem analizy czynnikowej było także porównanie wód dwóch badanych zlewni. Wykorzystano więc tylko te parametry, które w obu populacjach miały wystarczającą reprezentację i wykazywały zróżnicowanie. Warunkiem stosowania analizy czynnikowej jest założenie normalności rozkładu parametrów włączonych do analizy. W związku z tym parametry wód podziemnych i powierzchniowych poddano testowaniu na normalność rozkładu. Do testowania użyto testu normalności Kolmogorowa-Smirnowa. Test ten jest polecany przez Norcliffa (1986). Parametry, które nie spełniły warunków testowania, znormalizowano przez logarytmowanie. Ostatecznie do analizy czynnikowej użyto tylko tych parametrów, które spełniły warunki testu normalności. W następnej kolejności dane wyjściowe poddano standaryzacji. Dzięki tej transformacji jest możliwa jedno-

czesna interpretacja danych wyrażonych w różnych jednostkach i mianach, np. odczynu pH, przewodnictwa elektrycznego i zawartości wagowej jonów (Liszkowska, 1995; Drever, 1997; Manly, 1998; Dragon, 2002). Dane wyjściowe poddano następnie transformacji, wykorzystując procedurę składowych głównych, w celu wyodrębnienia czynników. Pierwszy wyodrębniony czynnik tłumaczy największą część wariacji zmiennych, a każdy kolejny coraz mniejszą jej część. W ten sposób utworzono macierz korelacji ładunków czynnikowych, z których każdy opisuje, w jakim stopniu wyodrębnione składowe główne są skorelowane z poszczególnymi zmiennymi wyjściowymi. Ładunki czynnikowe przyjmują wartości od –1 do 1. Stosując dwa kryteria statystyczne: 1) Kaisera oraz 2) graficzny „test ospiska”, wyodrębniono trzy czynniki dla każdej badanej zlewni w obu analizowanych populacjach. W celu uzyskania przejrzystego układu ładunków, czyli uzyskania wysokich ładunków czynnikowych przy jednych zmiennych i niskich przy innych, dane poddano tzw. rotacji *varimax*. W wyniku tej procedury wyodrębniono najbardziej wyraźne „skupienia” zmiennych. Na przyjętym poziomie istotności, równym 0,05, po przeprowadzeniu rotacji za istotne przyjęto wartości ładunków czynnikowych > 0,7 lub < –0,7. W dalszej kolejności obliczono procentowy udział poszczególnych czynników w całkowitej zmienności analizowanego zbioru. Otrzymane czynniki opisują ok. 76–77% zmienności analizowanych parametrów (tab. 1 i 2). Pozostała część wariacji może być przypisana czynnikom losowym, których nie można zinterpretować (Drever, 1997; Manly, 1998; Dragon, 2002).

Otrzymane czynniki oraz ich korelacje ze zmiennymi interpretowano procesami przyrodniczymi, które doprowadziły do obserwowanego zróżnicowania macierzy ładunków czynnikowych. Wynik analizy czynnikowej jest najbardziej czytelny, gdy liczba czynników jest mała, zasoby zmiennej wspólnej bliskie 1, a otrzymane czynniki można czytelnie interpretować procesami przyrodniczymi (Drever, 1997). Przeprowadzona przez autorów analiza czynnikowa metodą składowych głównych spełnia powyższe założenia.

Wyniki uzyskane na drodze analizy czynnikowej zostały pozytywnie zweryfikowane modelowaniem hydrogeochemicznym (wskaźników nasycenia SI) przy użyciu programu *PhreeqCI* (Apello & Postma, 1993). Autorzy dysponowali w pracach modelowych szerszym zakresem danych chemicznych niż włączono do analizy statystycznej, np. stężeniami jonów  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{og}}$ , wartościami potencjału redox czy stężeniem rozpuszczonego tlenu.

### Wyniki

Utworzona dla wód zlewni Kamienicy macierz korelacji ładunków czynnikowych przedstawiono w tabeli 1. Z uzyskanych wartości wynika, że czynnik 1. jest identyfikowany z przewodnością elektryczną, jonami  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{Na}^+$  oraz w mniejszym stopniu z  $\text{SiO}_2$ . Czynnik 2. można identyfikować z jonami  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$  i  $\text{SiO}_2$ , natomiast w mniejszym stopniu z jonami  $\text{Na}^+$ . Czynnik 3. jest związany z jonami  $\text{NO}_3^-$  i  $\text{Cl}^-$ .

Macierz korelacji ładunków czynnikowych dla wód zlewni Małej Bystrzycy przedstawiono w tabeli 2. Mimo, że udział wydzielonych czynników jest w zlewni Małej Bystrzycy odmienny niż w zlewni Kamienicy, to poszczególne czynniki wykazują podobieństwa, dlatego w macierzy ładunków czynnikowych dla zlewni Małej Bystrzycy, w celu ułatwienia porównań, nadano czynnikom numery niezgodne z hierarchią statystyczną. Uzyskane wyniki

pozwalają identyfikować czynnik 1. z twardością ogólną, jonami  $\text{HCO}_3^-$  oraz  $\text{Ca}^{2+}$  oraz z przewodnictwem elektrycznym. Czynnik 2. zidentyfikowano z jonami  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  oraz  $\text{SiO}_2$ . Czynnik 3. jest związany z jonami  $\text{NO}_3^-$  i  $\text{Cl}^-$ .

Każdy z uzyskanych czynników zinterpretowano, jako odrębne środowisko dostarczające składników chemicznych do ultrasłodkich i słodkich wód podziemnych i powierzchniowych.

### Dyskusja

Wyniki analizy czynnikowej wód podziemnych i powierzchniowych w badanych zlewniach wykazały, że czynnik 3. można identyfikować ze składową opadową (meteorologiczną). Wartości ładunków czynnikowych wskazują na związek czynnika 3. z jonami  $\text{Cl}^-$  i  $\text{NO}_3^-$  w obu badanych zlewniach (tab. 1, 2). Ładunek tych jonów prawdopodobnie w całości pochodzi z antropogenicznie zmienionych opadów, a wzrost ich koncentracji w badanych wodach zachodzi na drodze ewapotranspiracji. Wskaźnik ewapotranspiracji w obu badanych zlewniach, obliczony wg Apella & Postmy (2003), wynosi 1,7. Na uwagę zasługuje także fakt, że wyróżniona na podstawie wyników badań składowa opadowa (meteorologiczna) nie może być identyfikowana z

jonami  $\text{SO}_4^{2-}$  (tab. 1, 2). W obu badanych zlewniach składowa meteorologiczna odpowiada za 10% zmienności chemicznej badanych wód, ma więc najmniejszy udział ze wszystkich wydzielonych składowych (tab. 1, 2).

W procedurze analizy czynnikowej w wodach obu badanych zlewni wyodrębniono dwie podstawowe składowe wyjaśniające zmienność chemiczną badanych wód. Składowe te powiązane ze środowiskiem geologicznym. Na tej podstawie przyjęto, że czynniki geologiczne odpowiadają za 66–67% zmienności chemicznej wód podziemnych i powierzchniowych (tab. 1, 2). Świadczy to o dużym udziale środowiska skalnego w kształtowaniu typu chemicznego wód Kamienicy i Małej Bystrzycy. Wydzielone czynniki, dzięki zbliżonym wartościom ładunków czynnikowych w obu macierzach, można identyfikować z tymi samymi procesami zachodzącymi w środowisku przepływu wód obu zlewni.

Czynnik 1. zidentyfikowano jako składową reprezentującą niższą część strefy osadów rumoszowych oraz strefę spękanej skały (przejściowa strefa przepływu). Procesy zachodzące w tej strefie powodują największy wzrost wartości mineralizacji ogólnej badanych wód, o czym świadczą wysokie ładunki czynnikowe pomiędzy tą składową a przewodnictwem elektrycznym (tab. 1, 2). W strefie tej pod-

**Tab. 1. Macierz ładunków czynnikowych dla wód zlewni Kamienicy**

Table 1. Factor loadings matrix of Kamienica river catchment's water

Parametr <i>Parameter</i>	Czynnik 1. <i>Factor 1</i>	Czynnik 2. <i>Factor 2</i>	Czynnik 3. <i>Factor 3</i>	Zmienność wspólna <i>Community</i>
pH	0,38	-0,37	0,19	0,66
Przew. elektr. wł.; <i>Electrical conductivity</i>	0,79	0,16	0,18	0,88
Twardość ogólna; <i>Total hardness</i>	0,94	-0,03	0,09	0,92
$\text{HCO}_3^-$	0,95	0,10	-0,10	0,99
$\text{SO}_4^{2-}$	-0,06	0,75	-0,34	0,60
$\text{Cl}^-$	0,35	-0,05	0,71	0,65
$\text{NO}_3^-$	-0,17	-0,18	0,84	0,64
$\text{Ca}^{2+}$	0,92	-0,01	0,13	0,56
$\text{Mg}^{2+}$	0,73	0,03	0,05	0,77
$\text{Na}^+$	0,71	0,62	0,13	0,92
$\text{K}^+$	-0,11	0,84	-0,22	0,72
$\text{SiO}_2$	0,49	0,77	0,13	0,82
Udział w zmienności [%]; <i>Part of diversity [%]</i>	46	20	10	

**Tab. 2. Macierz ładunków czynnikowych dla wód zlewni Małej Bystrzycy**

Table 2. Factor loadings matrix of Mała Bystrzyca river catchment's water

Parametr <i>Parameter</i>	Czynnik 1. <i>Factor 1</i>	Czynnik 2. <i>Factor 2</i>	Czynnik 3. <i>Factor 3</i>	Zmienność wspólna <i>Community</i>
pH	0,50	-0,35	0,04	0,55
Przew. elektr. wł.; <i>Electrical conductivity</i>	0,72	0,19	0,62	0,79
Twardość ogólna; <i>Total hardness</i>	0,95	-0,01	0,33	0,99
$\text{HCO}_3^-$	0,74	-0,51	-0,25	0,97
$\text{SO}_4^{2-}$	-0,16	0,85	0,32	0,94
$\text{Cl}^-$	0,06	0,21	0,90	0,83
$\text{NO}_3^-$	0,27	0,32	0,77	0,85
$\text{Ca}^{2+}$	0,82	-0,38	0,19	0,99
$\text{Mg}^{2+}$	0,38	0,53	0,30	0,99
$\text{Na}^+$	-0,14	0,81	0,39	0,89
$\text{K}^+$	-0,12	0,72	-0,42	0,53
$\text{SiO}_2$	-0,29	0,86	0,32	0,92
Udział w zmienności [%]; <i>Part of diversity [%]</i>	28	39	10	



czas przepływu następuje wzrost odczynu pH wód. Wymywane są z niej również jony  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{Na}^+$ , które pochodzą z procesów wietrzenia glinokrzemianów. Na możliwość wietrzenia plagioklazów, piroksenów i chlorytów w badanym środowisku wskazują ujemne wskaźniki nasycenia w stosunku do tych minerałów (tab. 3). Najlepsze warunki do wietrzenia chemicznego glinokrzemianów zachodzą w strefie rumoszu skalnego, ze względu na naruszoną strukturę minerałów oraz rozdrobnienie skały macierzystej, w związku z tym prawdopodobnie w tej strefie wietrzenie chemiczne jest najintensywniejsze (Macioszczyk & Dobrzyński, 2002). Jony  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  i  $\text{Na}^+$  mogą być z niej przenoszone w głębsze partie górotworu. Dobre właściwości migracyjne tych jonów wykazał Sachanbiński (1994) w krystalicznym środowisku przepływu wód okolic Jakuszyc w Karkonoszach oraz Małecki (1998) w wodach z Hali Gąsienicowej w Tatrach. Zaobserwowane niskie ładunki czynnikowe dla stężeń  $\text{SiO}_2$  w analizowanej macierzy zlewni Kamienicy oraz ujemne w zlewni Małej Bystrzycy mogą świadczyć o znacznej roli wietrzenia żył kalcytowych, obecnych w środowisku przepływu wód, szczególnie w zlewni Małej Bystrzycy. Wskazuje na to również fakt, że czynnik 1. w zlewni Małej Bystrzycy nie wykazuje korelacji z jonem  $\text{Na}^+$ . Słaba korelacja  $\text{SiO}_2$  z czynnikiem 1. może również wynikać z niewielkiej zdolności migracyjnej tego składnika w porównaniu do jonów wapniowych i magnezowych (Małecki, 1998).

Czynnik 1. w zlewni Kamienicy odpowiada za 46% zmienności chemicznej badanych wód, jest więc w tej zlewni czynnikiem dominującym (tab. 1). Ponieważ utożsamiono go z głębszymi strefami przepływu wód w zlewni, można przypuszczać, że w zlewni Kamienicy ilościowo przeważa przepływ z głębszych stref przepływu wód. W zlewni Małej Bystrzycy czynnik 1. odpowiada za 28% zmienności chemicznej badanych wód, nie jest więc czynnikiem dominującym ilościowo, mimo że wpływa w największym stopniu na przewodnictwo elektryczne, na co wskazuje wysoki ładunek czynnikowy. Niższy udział czynnika 1. w zlewni Małej Bystrzycy może świadczyć o mniejszym udziale głębszych stref przepływu wód w kształtowaniu odpływu z tej zlewni (tab. 2).

Czynnik 2. zidentyfikowano jako składową reprezentującą strefę zwietrzliny (lokalna strefa przepływu). Procesy zachodzące w tej strefie powodują dostawę do wód podziemnych i powierzchniowych jonów  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_2$

oraz w przypadku zlewni Małej Bystrzycy jonów  $\text{Na}^+$  (tab. 1, 2). Czynniki 2. nie jest skorelowany z przewodnictwem elektrycznym, nie wpływa więc znacząco na mineralizację badanych wód. Identyfikacja czynnika 2. z powyższymi składnikami wskazuje na znaczącą rolę procesów biochemicznych, sorpcji i wymiany jonowej, zachodzących na drodze procesów rozkładu materii organicznej oraz wietrzenia glinokrzemianów. Ze wszystkich rozpatrywanych jonów jon  $\text{K}^+$  najłatwiej ulega sorpcji przez minerały ilaste i wymianie jonowej, głównie z jonem  $\text{Na}^+$  (Mochon, 1983; Apello & Postma, 1993; Macioszczyk & Dobrzyński, 2002). Prawdopodobnie prawie cały ładunek tego jonu pochodzi z dostawy atmosferycznej. Procesy sorpcyjne powodują jednak identyfikację jonu  $\text{K}^+$  ze środowiskiem geologicznym. O tym, że jon  $\text{K}^+$  w wodach obu badanych zlewni nie może pochodzić ze środowiska skalnego, świadczą przede wszystkim obliczone dodatkowo wartości wskaźnika nasycenia wobec minerałów zawierających ten pierwiastek (tab. 3). Pogląd ten jest przeciwstawny do wniosków Mochonia (1983), który wskazuje na pochodzenie jonu  $\text{K}^+$  z wietrzenia glinokrzemianów potasowych w obszarach źródłowych sąsiedniej do zlewni Kamienicy, zlewni Kleśnicy.

Niskie zdolności migracyjne  $\text{SiO}_2$  pochodzącego z wietrzenia glinokrzemianów, wykazane przez Małeckiego (1998), oraz możliwość obecności krzemionkowych kolidów glebowych powodują, że występowanie  $\text{SiO}_2$  w badanych wodach można identyfikować z dostawą krzemionki z najpłytszej strefy przepływu wód. Obliczone wskaźniki nasycenia wobec minerałów budujących środowisko przepływu wykazały, że badane wody nie są agresywne w stosunku do takich potencjalnych źródeł krzemionki, jak: kwarc, chalcedon, muskowitz, kaolinit i illit. Stwierdzono natomiast możliwość rozpuszczania przez badane wody amorficznej krzemionki oraz glinokrzemianów, np. z szeregu albit–anortyt i diopsydu (tab. 3). Identyfikacja  $\text{SiO}_2$  z najpłytszą strefą przepływu wód świadczy o tym, że wskaźnik ten nie może być wykorzystywany jako indyktor głębokiego przepływu wód ultraślodkich Sudetów, jak sugerują Staško i Wojtkowiak (2004) oraz Modelaska i Staško (2003).

Stwierdzony na drodze analizy czynnikowej związek mineralno-organicznych i aktywnych biologicznie stref wodonośnych z ładunkiem jonów  $\text{SO}_4^{2-}$  w obu badanych zlewniach świadczy, zdaniem autorów, o przeważnie biogenicznym lub geogenicznym pochodzeniu jonów siarcza-

Tab. 3. Wyniki modelowania wskaźnika SI — wartości średnie

Table 3. Result of SI modeling calculation — mean values

Minerały <i>Minerals</i>	Średnie wartości SI — wody podziemne i powierzchniowe <i>SI mean values — groundwater and surface water</i>	
	Zlewnia Kamienicy <i>Kamienica river catchment</i>	Zlewnia Małej Bystrzycy <i>Mala Bystrzyca river catchment</i>
Kwarc $\text{SiO}_2$ — <i>Quartz</i>	0,56	0,40
Chalcedon $\text{SiO}_2$ — <i>Chalcedony</i>	0,00	0,00
Amorficzna krzemionka $\text{SiO}_2(\text{a})$ — <i>Amorphous silica</i>	-0,79	-0,87
Albit $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ — <i>Albite</i>	-1,88	-2,02
Anortyt $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ — <i>Anorthite</i>	-2,98	-3,16
Diopsyd $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ — <i>Diopside</i>	-7,66	-8,88
Chloryt $\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ — <i>Chlorite</i>	-13,27	-15,28
Muskowit $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ — <i>Muscovite</i>	9,92	10,73
Kalcyt $\text{CaCO}_3$ — <i>Calcite</i>	-2,22	2,25
Kaolinit $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ — <i>Kaolinite</i>	6,09	6,75
Illit $\text{K}_{0,6}\text{Mg}_{0,25}\text{Al}_{2,3}\text{Si}_{3,5}\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ — <i>Illite</i>	3,29	3,72

nowych. Możliwe jest również włączanie jonu  $\text{SO}_4^{2-}$  pochodzącego z opadów do procesów biologicznych zachodzących w najpłytszej strefie przepływu wód podziemnych, co również może powodować identyfikację tego składnika z czynnikiem 2.

Czynnik 2. w zlewni Kamienicy odpowiada za 20% zmienności chemicznej badanych wód, jest więc składową podrzędną. Ponieważ składowa ta jest identyfikowana z najpłytszą strefą przepływu wód, można uznać, że strefa ta odgrywa mniejszą rolę w dostawie ładunku jonów do wód zlewni Kamienicy. W zlewni Małej Bystrzycy płytka strefa przepływu wód jest strefą dominującą. W zlewni tej procesy hydrochemiczne zachodzące w płytkiej strefie odpowiadają za 39% zmienności chemicznej badanych wód (tab. 2), dlatego też w zlewni Małej Bystrzycy strefa płytka odgrywa prawdopodobnie większą rolę w dostawie wody niż w zlewni Kamienicy.

### Wnioski

Zastosowanie analizy czynnikowej w badaniach hydrochemicznych dwóch zlewni górskich w Sudetach pozwoliło na wyciągnięcie następujących wniosków.

Wody opadowe oraz proces zagęszczania roztworu wodnego na drodze ewapotranspiracji mają najmniejszy wpływ na zmienność chemiczną badanych wód i odpowiadają za ok. 10% zmienności chemicznej wód podziemnych i powierzchniowych w badanych zlewniach. Wody opadowe są zasadniczym źródłem dostawy jonów  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  oraz  $\text{K}^+$  do badanych wód podziemnych i powierzchniowych.

Wydzielono dwie strefy przepływu wód podziemnych, będące źródłem zmienności chemicznej analizowanych wód. Strefa lokalnego (płytkiego) przepływu wód jest związana z utworami zwietrzelinowymi. Strefa ta jest odpowiedzialna za zmianę stężeń  $\text{SiO}_2$ , jonów  $\text{SO}_4^{2-}$  oraz  $\text{K}^+$  (również  $\text{Na}^+$  w zlewni Małej Bystrzycy). Nie wpływa ona jednak w zasadniczym stopniu na mineralizację ogólną badanych wód. Strefa przejściowego (głębszego) przepływu wód wiąże się ze spękaną skałą oraz rumoszem. Strefa ta kształtuje mineralizację ogólną badanych wód i jest odpowiedzialna za zmiany stężeń jonów  $\text{Ca}^{2+}$  oraz  $\text{HCO}_3^-$  (również  $\text{Na}^+$  i  $\text{Mg}^{2+}$  w zlewni Kamienicy).

Wydzielone strefy przepływu wód podziemnych mają odmienne znaczenie w badanych zlewniach Kamienicy i Małej Bystrzycy. W zlewni Kamienicy dominuje system przejściowy. Odpowiada on za 46% zmienności chemicznej badanych wód. System lokalnego przepływu odpowiada za 20% zmienności chemicznej wód w tej zlewni. Świadczy to o dominacji przejściowego systemu krążenia wód w zlewni Kamienicy również w ujęciu ilościowym. W zlewni Małej Bystrzycy dominuje system lokalny. Odpowiada on za 39% zmienności chemicznej badanych wód. System przejściowy przepływu odpowiada za 28% zmienności chemicznej wód w tej zlewni. Świadczy to o przewadze lokalnego systemu krążenia wód podziemnych w zlewni Małej Bystrzycy.

Krzemionka rozpuszczona w wodach badanych zlewni pochodzi ze zwietrzliny pokrywającej strefę spękaną skały i dlatego też nie może być ona traktowana jako indyktor dopływu wody z regionalnych systemów krążenia w płytkich wodach podziemnych i powierzchniowych masywów krystalicznych Sudetów.

Obecność jonu siarczanowego w badanych wodach jest ściśle związana ze środowiskiem przepływu tych wód. Zasadniczy ładunek jonów siarczanowych w wodach podziemnych i powierzchniowych zlewni Kamienicy i Małej

Bystrzycy jest prawdopodobnie pochodzenia biogenicznego i powstaje lub jest przetrzymywany w aktywnej biologicznej strefie zwietrzliny.

### Literatura

- APELLO C.A.J. & POSTMA D. 1993 — Geochemistry, groundwater and pollution. A.A. Balkema, Rotterdam.
- DON J., DUMICZ M., WOJCIECHOWSKA I. & ŻELAŻNIEWICZ A. 1990 — Lithology and tectonics of Orlica-Śnieżnik Dome, Sudetes — Recent state of knowledge. N. Jb. Geol. Paleont. Abh: 179–213.
- DREVER J.I. 1997 — The Geochemistry of Natural Waters, Surface and Groundwater Environments. Prentice Hall, Wyoming: 436.
- DRAGON K. 2002 — Zastosowanie analizy czynnikowej w celu antropogenicznych przemian jakości wód podziemnych. Prz. Geol., 50: 127–131.
- EVANS C.D., DAVIES T.D., WIGINGTON JR. P.J., TRANTER M. & KRESTER W.A. 1996 — Use a factor analysis to investigate processes controlling the chemical composition of four streams in the Adirondack Mountains, New York. J. Hydrology, 185: 297–316.
- FARNHAM I.M., JOHANNESON K.H., SINGH A.K., HODGE V.F. & STETZENBACH K.J. 2003 — Factor analytical approaches for evaluating groundwater trace element chemistry data. Analytica Chimica Acta, 490: 123–138.
- KRYZA H. 1983 — Wody podziemne północnej części Masywu Śnieżnika. [W:] Współczesne Problemy Hydrogeologii Regionalnej, t. II, Łądek Zdrój, 13-16 października 1982 r. Wyd. UWroc.
- KRYZA J. 1988 — Zasoby wód podziemnych Sudetów na tle odpływu podziemnego. Acta Univ. Wratisl. 964, Pr. Geol.-Miner. 11/2: 25–37.
- LISZKOWSKA E. 1995 — Analiza czynnikowa jako obiektywna metoda określania genezy składu chemicznego oraz źródeł zanieczyszczeń wód podziemnych. [W:] Współczesne Problemy Hydrogeologii, t. VII, Wyd. Profil, Kraków.
- MACIOSZCZYK A. & DOBRZYŃSKI D. 2002 — Hydrogeochemia strefy aktywnej wymiany wód podziemnych. PWN.
- MAŁECKI J.J. 1998 — Rola strefy aeracji w kształtowaniu składu chemicznego płytkich wód podziemnych wybranych środowisk hydrogeochemicznych. Biul. Państw. Inst. Geol. 381: 219.
- MANLY B.F.J. 1998 — Multivariate Statistical Methods. Capman and Hall, New York.
- MAZUREK M. 2000 — Zmienność transportu materiału rozpuszczonego w zlewni Kludy jako przejaw współczesnych procesów denudacji chemicznej (Pomorze Zachodnie). Wyd. Nauk. UAM, Poznań.
- MOCHOŃ A. 1983 — Chemizm wód podziemnych obszaru źródłowego Kleśnicy. [W:] Współczesne Problemy Hydrogeologii Regionalnej, t. II, Łądek Zdrój, 13-16 października 1982 r. Wyd. UWroc.
- MODELSKA M. & STAŚKO S. 2003 — Skład chemiczny oraz oddziaływanie wód podziemnych na wody powierzchniowe w górnej części zlewni Kamienicy. [W:] Współczesne Problemy Hydrogeologii, t. XI, cz. 2, P. Kozerski & B. Jaworska-Szulc (red.), Wyd. Wydz. Bud. Wod. i Inż. Środ. Pol. Gdańskiej.
- MODELSKA M. & BUCZYŃSKI S. 2005 — Zmiany w środowisku hydrochemicznym Sudetów Wschodnich na skutek redukcji zanieczyszczeń atmosferycznych — zlewnia Kamienicy i Małej Bystrzycy. [W:] Zagadnienia interdyscyplinarne w górnictwie i geologii, Szklarska Poręba. Wyd. Pol. Wroc.
- MODELSKA M. & OLIHWER T. 2004 — Wstępne wyniki badań fizykochemicznych wód zlewni Małej Bystrzycy. [W:] Zagadnienia interdyscyplinarne w górnictwie i geologii, IV Konferencja Doktorantów, Pr. Nauk. Inst. Gór. PWroc., 107: 34–350.
- NORCLIFFE G.B. 1986 — Statystyka dla geografów, wprowadzenie. PWN.
- SACHANBIŃSKI M. 1994 — Geochemiczna charakterystyka krajobrazów rejonu Jakuszyce (Karkonosze). [W:] Karkonoskie Badania Ekologiczne. Z. Fischer (red.), II Konferencja, Dziekanów Leśny, 17-19.01.1994. Wyd. Inst. Ekologii PAN.
- STAŚKO S. 1996 — Wody podziemne w skałach krystalicznych na podstawie badań wybranych obszarów Sudetów polskich. Acta Univ. Wratisl. 1870, Pr. Geol.-Miner., 53: 1–86.
- STAŚKO S. & WOJTKOWIAK A. 2004 — Występowanie i jakość wód podziemnych w skałach krystalicznych Sudetów na podstawie badań ujęć. Prz. Geol., 52: 69–75.
- TARKA R. 1993 — Formy zasilania a odpływ podziemny na przykładzie zlewni górskiej w Masywie Śnieżnika, Acta Univ. Wratisl. 1517, Pr. Geol.-Miner., 36: 129–144.
- TOMASZEWSKI J. 1989 — Kształtowanie się wód podziemnych w pokrywach zwietrzelinowych górskich obszarów Sudetów. [W:] Problemy hydrogeologiczne południowo-zachodniej Polski. Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc., 58, Konferencje, 29: 157–162.

Praca wpłynęła do redakcji 20.07.2006 r.  
Akceptowano do druku 10.10.2006 r.