

## WYKORZYSTANIE MODELU NUMERYCZNEGO DO OBLICZEŃ DENUDACJI CHEMICZNEJ ZLEWNI POTOKU BIAŁEGO (TATRY ZACHODNIE)

### APPLICATION OF A NUMERICAL MODEL FOR CALCULATING CHEMICAL DENUDATION RATES IN THE BIAŁY STREAM DRAINAGE BASIN (WEST TATRA MTS.)

JERZY J. MAŁECKI<sup>1</sup>, MARZENA SZOSTAKIEWICZ-HOŁOWNIA<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Denudacja chemiczna jest rozumiana jako zespół procesów prowadzących do usunięcia z obszarów lądowych masy skalnej rozpuszczonej w wodzie. Znajomość przebiegu tych procesów jest niezbędna do rozpoznania cykli geochemicznych zachodzących w danym obszarze. Denudacja jest również jednym z głównych czynników kształtujących powierzchnię Ziemi. W artykule przedstawiono zastosowanie nowej metodyki oceny ilościowej denudacji chemicznej, wykorzystującej równowagowy model geochemiczny. Model ten uwzględnia całokształt procesów zachodzących w warstwie wodonośnej, między innymi różną rozpuszczalność i gęstość poszczególnych minerałów oraz udział dwutlenku węgla w rozpuszczaniu węglanów.

**Słowa kluczowe:** denudacja chemiczna, model geochemiczny, Tatry Zachodnie.

**Abstract.** Chemical denudation is understood as a set of processes leading to the removal of rock mass from land areas in water solution. The knowledge of these processes is necessary to recognise the geochemical cycles operating within a given area. Denudation is also one of the major factors controlling the Earth surface. The paper presents the application of a new method of quantitative evaluation of chemical denudation using an equilibrium geochemical model. The model involves the whole of the processes that operate within the aquifer, among others different solubilities and densities of individual minerals and the contribution of carbon dioxide to carbonate solubility.

**Key words:** chemical denudation, geochemical model, West Tatra Mts.

## WSTĘP

Denudacja to procesy niszczące i kształtujące powierzchnię Ziemi. Część z nich, powodująca usuwanie z obszarów lądowych masy skalnej rozpuszczonej w wodzie, stanowi denudacja chemiczna. Jest ona jednym z głównych czynników kształtujących chemizm wód powierzchniowych i podziemnych, będąc jednym z elementów obiegu pierwiastków w przyrodzie (Habič, 1968; Gebeczaw, 1977; Kiknadse, 1977 *vide* Dublyanskiy, 1980; Małecki, 1995; Pulina, 1999; Allen, 2000; Macioszczyk, Dobrzyński, 2002; Gabet, 2007). Intensywność denudacji chemicznej zależy od wielu czynników, ale spośród nich główne znaczenie ma wytrącanie i rozpuszczanie minerałów. Pierwsze próby ilościowej oceny denuda-

cji chemicznej podjęto już na początku XX wieku (Kuber, 1915 *vide* Dublyanskiy, 1980). Badania te są nadal współcześnie prowadzone przez licznych badaczy (Mihevic, 1996; Stephenson, Kirk, 1996; Matsukura, Hirose, 1999; Pulina, 1999; Trudgill i in., 2001; Campbell i in., 2002; Mottershead i in., 2003; Riebe i in., 2003; Małecki, Szostakiewicz, 2004, 2005, 2006; Blanckenburg, 2005; Dixon, Thorn, 2005; Kirchner i in., 2006). Dotychczas stosowane metody nie uwzględniają różnic w rozpuszczalności i gęstości poszczególnych minerałów, a często również udziału dwutlenku węgla w rozpuszczaniu węglanów.

<sup>1</sup> Uniwersytet Warszawski, Wydział Geologii, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; e-mail: Jerzy.Malecki@uw.edu.pl, marzena.szostakiewicz@uw.edu.pl

W artykule przedstawiono procedurę i wyniki obliczeń denudacji chemicznej metodą wykorzystującą model geochemiczny. Poligonem doświadczalnym była zlewnia potoku Białego (Tatry Zachodnie), położona na południe od Zakopanego, w obrębie Tatrzańskiego Parku Narodowego. Przy wyborze poligonu brano pod uwagę szereg kryteriów, między innymi:

– zrównoważony bilans zlewni oraz współkształtność działu wodnego powierzchniowego i podziemnego; dzięki temu praktycznie wykluczono lateralne dopływy lub uciecz-

ki wód mogące dostarczać lub usuwać z układu ładunki, co uniemożliwiłoby prawidłową ocenę denudacji chemicznej i bilans ładunków;

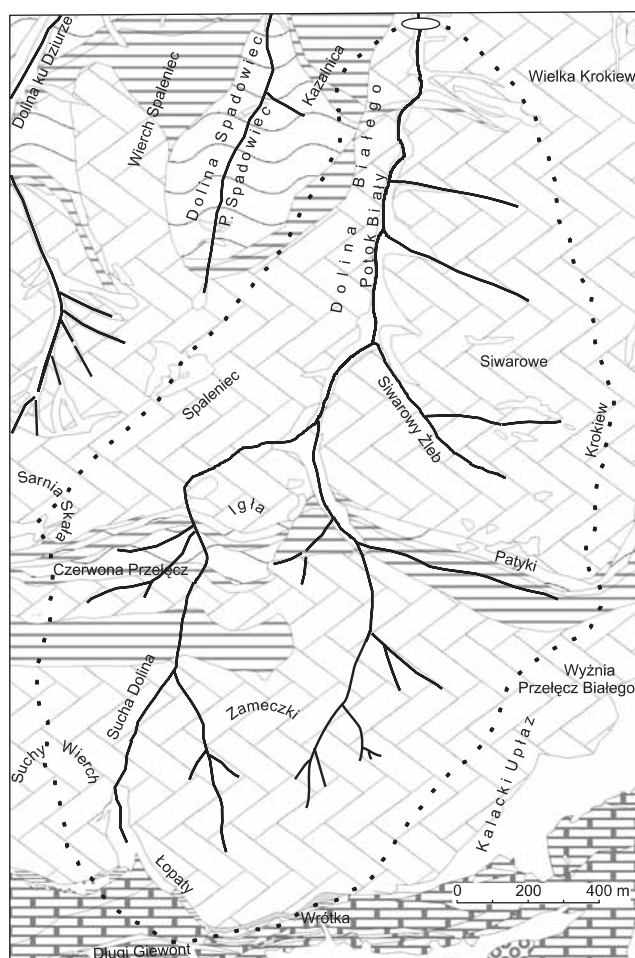
– niewielki udział czynników antropogenicznych – ścieków bytowych i przemysłowych, utrudniających określenie wartości denudacji chemicznej;

– dostępność wiarygodnych danych archiwalnych dotyczących rozpoznania warunków klimatycznych, geologicznych i hydrogeologicznych.

## CHARAKTERYSTYKA POLIGONU BADAWCZEGO

Zlewnia potoku Białego jest zbudowana głównie z triasowych dolomitów i wapieni (fig. 1). W składzie mineralnym tych utworów dominują dolomit i kalcyt. Lokalnie występujące skały okruchowe są zbudowane głównie z kwarcu,

kalcytu i dolomitu. Podrzednie występują w nich minerały ilaste (głównie illit), plagioklasy, tlenki żelaza i manganu oraz krzemionka. W żyłach kalcytowych spotyka się okruszczenie pirytem (Turnau-Morawska, 1953; Korczyńska-



osady rzeczne tarasów niskich i wysokich, zwietrzeliny i koluwia (czwartorzęd)  
fluvial deposits of lower and upper terraces; weathering covers (Quaternary)

### Seria reglowa (Sub-Tatric Units)

łupki, margle i wapień, piaskowce (jura)  
shales, marls and limestones, sandstones (Jurassic)

łupki, piaskowce, zlepienie, dolomity i wapień (trias)  
shales, sandstones, conglomerates, dolomites and limestones (Triassic)

dolomity, wapień dolomityczny, wapień (trias)  
dolomites, dolomitic limestones, limestones (Triassic)

łupki i kwarcyty (trias)  
shales and quartzite (Triassic)

### Seria wierchowa (High-Tatric Units)

wapień, wapień dolomityczny, dolomity (trias–kreda)  
limestones, dolomitic limestones, dolomites (Triassic–Cretaceous)

łupki (trias)  
shales (Triassic)

kwarcyty i piaskowce (trias)  
quartzite and sandstones (Triassic)

granica badanej zlewni  
border of catchment

potok  
stream

przekrój hydrometryczny  
hydrometric sections-site of surface water test

Wykonano na podstawie (created after):

Mapy Geologicznej Tatr w skali 1:10 000 ark. Czerwone Wierchy (Michalik, 1958) i ark. Łysanki (Guzik i in., 1955)

Mapy Geologicznej Tatr Polskich w skali 1:30 000 (Bac-Moszaszwili i in., 1979)

oraz podziału regli zakopiańskich na jednostki tektoniczne wg Bac-Moszaszwili (1998)

**Fig. 1. Budowa geologiczna poligonu**

Geological map of the Biały Stream catchment

-Oszacka, 1977, 1979; Bąk i in., 1994; Pawlikowski i in., 1997). Wody podziemne zlewni potoku Białego są zasilane przez infiltrację wód opadowych i drenowane przez ciekły powierzchniowy oraz źródła. Przeprowadzone badania wykazały, że bilans wodny tego obszaru jest zrównoważony (Szołkiewicz, 2005).

Wody powierzchniowe i podziemne charakteryzują się odczynem słabo zasadowym oraz mineralizacją ogólną zawartą się w przedziale 200–300 mg/dm<sup>3</sup>. Są to wody średnio twarde (Pazdro, Kozerski, 1990), z wyraźną dominacją twar-

dości węglanowej, co jest związane z litologią utworów budujących zlewnię. Wartości potencjału utleniająco-redukcyjnego (300–400 mV) wskazują na istnienie warunków utleniających w warstwie wodonośnej. Ten zakres wartości Eh, przy pH 7,5–8,1, jest charakterystyczny dla wód podziemnych strefy aktywnej wymiany zwietrzelin skał węglanowych (Macioszczyk, Dobrzyński, 2002). W składzie chemicznym wód powierzchniowych i podziemnych dominują jony wapniowe i magnezowe oraz wodorowęglanowe. Zgodnie z zapisem Szczukariewa–Prikłońskiego (Dowgiałło i in., 2002) są to wody typu HCO<sub>3</sub>–Ca–Mg.

## ILOŚCIOWA OCENA DENUDACJI CHEMICZNEJ

Ilościowe określenie denudacji chemicznej wymaga znajomości natężenia odpływu wód z poligonu oraz masy substancji w nich rozpuszczonej. W celu zebrania tych danych w latach 2002–2004 w zlewni potoku Białego co kwartał prowadzono monitoring właściwości fizykochemicznych wód opadowych, powierzchniowych i podziemnych, obejmujący pomiary temperatury, odczynu, potencjału utleniająco-redukcyjnego, przewodności elektrolitycznej właściwej oraz składu chemicznego. W próbkach oznaczano stężenia makroskładników oraz żelaza, manganu, glinu i krzemionki. Ponadto w przekroju hydrometrycznym zamykającym obszar zlewni codziennie wykonywano pomiary stanów wód, które umożliwiły obliczenie objętości przepływu w cieku powierzchniowym.

Pierwszym etapem prac modelowych była schematyzacja i uproszczenie naturalnych warunków hydrodynamicznych i hydrochemicznych. W warstwie wodonośnej zachodzi jednocześnie wiele skomplikowanych procesów, których interakcje trudno jest odwzorować numerycznie. Z tego względu modele z reguły idealizują warunki rzeczywiste. Modele wykonano, przyjmując poniższe założenia:

- zasilanie wód podziemnych jest wyłącznie infiltracyjne, a drenaż następuje jedynie przez ciekły powierzchniowy i źródła;

- ze względu na zrównoważony bilans zlewni lateralne dopływy i ucieczki wód są niewielkie lub nie występują;

- chemizm wód podziemnych i powierzchniowych jest kształtowany przez skład chemiczny wód opadowych, parowanie terenowe, właściwości fizykochemiczne roztworów oraz rozpuszczanie i wytrącanie minerałów;

- w analizach modelowych całą zlewnię traktowano jako obszar bilansowy, zatem nie uwzględniono procesów mieszania się wód wewnątrz poligonu;

- rozpuszczanie węglanów odbywa się w „systemie otwartym”, w którym dwutlenek węgla jest cały czas dostarczany spoza układu, a jego ciśnienie parcjalne jest stałe. Przyjęcie takiego założenia umożliwiła analiza wartości logarytmów ciśnienia parcjalego dwutlenku węgla obliczonego dla wód podziemnych. Otrzymane wartości od –1,5 do –2,5 są charakterystyczne dla wód podziemnych, w których rozpusz-

czanie kalcytu przebiega w „systemie otwartym” (Appelo, Postma, 1993);

- minerały z grupy skaleni nie krystalizują z wód powierzchniowych i podziemnych, natomiast w wyniku ich wietrzenia powstają minerały ilaste (Polański, 1988; Bolewski, Manecki, 1993; Allen, 2000);

- przyjęto, że roztwór wodny znajduje się w stanie quasi-równowagowym z fazą stałą i gazową, opisanym przez wartości wskaźników nasycenia roztworu względem faz mineralnych budujących zlewnię;

- pominięto udział czynników antropogenicznych w kształtowaniu właściwości fizykochemicznych wód powierzchniowych i podziemnych.

Autorzy zdają sobie sprawę, że przyjęte założenia upraszczają naturalny system hydrogeochemiczny, jednakże nie wpływają w sposób zasadniczy na wiarygodność otrzymanych wyników.

Kolejnym etapem prac był wybór programu, który umożliwi wykonanie modelu numerycznego odwzorowującego procesy hydrogeochemiczne zachodzące w danym obszarze. Wybrano program PHREEQC v.2.11 z kompatybilną bazą danych termodynamicznych phreeq.dat. Umożliwia on określenie stanu roztworu, wykonanie modeli wprost i odwrotnych, uwzględnienie zmian temperatury na drodze filtracji oraz zateżenia rozpuszczonych składników w wyniku parowania terenowego. Ponadto jest on obecnie najpowszechniej wykorzystywanym i weryfikowanym na świecie programem umożliwiającym modelowanie geochemiczne (Macioszczyk, Witczak, 1999; Parkhurst, Appelo, 1999; Karlikowska i in., 2003).

Następnie wykonano pomocnicze modele odwrotne, które umożliwiły rozpoznanie podatności faz mineralnych na rozpuszczanie lub wytrącanie w warstwie wodonośnej. Dane wejściowe do modelu odwrotnego stanowiły parametry fizykochemiczne badanych wód oraz skład mineralny utworów budujących zlewnię potoku Białego. Wody opadowe zrównoważono względem dwutlenku węgla atmosferycznego. Modele konstruowano wykorzystując właściwości fizykochemiczne i skład jonowy wód powiązanych w cyklu hydrologicznym.

Dane wyjściowe z modelu odwrotnego posłużyły do wykonania modeli wprost. Roztwór wejściowy do modelu wprost stanowiła woda opadowa zrównoważona względem dwutlenku węgla atmosferycznego. W modelach wprost oprócz reakcji rozpuszczania i wytrącania uwzględniono również parowanie oraz zmiany temperaturowe na drodze filtracji.

Weryfikację wykonanych modeli wprost przeprowadzono przez porównanie danych wyjściowych z modelu z danymi terenowymi i laboratoryjnymi. Uzyskana zgodność przekraczała 95% (tab. 1).

Transfer mas otrzymany w wyniku modelowania wprost umożliwił określenie potencjalnych wielkości rozpuszczania

Tabela 1

**Przykład weryfikacji modelu (wprost)**  
Example of testing of forward model

Marzec 2003 r. (March 2003)

Opad atmosferyczny <i>Precipitation</i>		Woda powierzchniowa <i>Surface water</i>				Błąd* <i>Error</i>		
		Fazy rozpuszczane <i>Dissolved phases</i>		Parametry obliczone <i>Parameters calculated</i>		%		
		Fazy wytrącane <i>Precipitated phases</i>		Parametry pomierzone <i>Parameters measured</i>				
mol/L		mol/L		mol/L				
Na	1.26E-05	Kalcyt	7.35E-05	Na	2.55E-05	Na	2.61E-05	1.14
K	7.67E-06	Dolomit	5.91E-04	K	1.12E-05	K	1.15E-05	1.32
Ca	6.41E-05	CO <sub>2</sub> (g)	1.24E-03	Ca	8.06E-04	Ca	8.60E-04	3.25
Mg	2.02E-05	Gips	7.71E-05	Mg	6.10E-04	Mg	6.53E-04	3.39
Fe	5.37E-08	Halit	3.92E-06	Fe	5.28E-08	Fe	5.37E-08	0.89
Mn	1.82E-08	Skaleń potasowy	7.95E-06	Mn	1.73E-08	Mn	1.82E-08	2.50
Al	9.27E-07	Albit	8.98E-06	Al	9.51E-07	Al	9.27E-07	-1.26
SiO <sub>2</sub>	7.82E-07			SiO <sub>2</sub>	1.32E-05	SiO <sub>2</sub>	1.32E-05	-0.08
Cl	5.98E-05			Cl	6.37E-05	Cl	6.21E-05	-1.31
SO <sub>4</sub>	3.12E-07			SO <sub>4</sub>	7.74E-05	SO <sub>4</sub>	7.29E-05	-3.00
HCO <sub>3</sub>	1.62E-04			HCO <sub>3</sub>	2.71E-03	HCO <sub>3</sub>	2.61E-03	-1.86
pH	7.01	Illit	7.35E-06	pH	8.22	pH	8.20	
pe	6.73	SiO <sub>2</sub> (a)	1.27E-05	pe	6.89	pe	6.91	
		Piryty	9.38E-10					
		Piroluzyt	8.85E-10					

Kwiecień 2004 r. (April 2004)

Opad atmosferyczny <i>Precipitation</i>		Woda powierzchniowa <i>Surface water</i>				Błąd* <i>Error</i>		
		Fazy rozpuszczane <i>Dissolved phases</i>		Parametry obliczone <i>Parameters calculated</i>		%		
		Fazy wytrącane <i>Precipitated phases</i>		Parametry pomierzone <i>Parameters measured</i>				
mol/L		mol/L		mol/L				
Na	1.22E-05	Kalcyt	3.56E-04	Na	2.35E-05	Na	2.39E-05	0.95
K	5.37E-06	Dolomit	5.21E-04	K	8.86E-06	K	8.95E-06	0.51
Ca	5.99E-05	CO <sub>2</sub> (g)	1.40E-03	Ca	9.46E-04	Ca	1.00E-03	2.79
Mg	4.11E-06	Gips	8.34E-06	Mg	5.25E-04	Mg	5.48E-04	2.23
Fe	1.79E-08	Halit	7.95E-06	Fe	1.80E-08	Fe	1.79E-08	-0.20
Mn	1.82E-08	Skaleń potasowy	5.41E-06	Mn	1.83E-08	Mn	1.82E-08	-0.22
Al	2.22E-07	Albit	3.36E-06	Al	1.65E-06	Al	1.59E-06	-1.82
SiO <sub>2</sub>	1.33E-07			SiO <sub>2</sub>	1.04E-05	SiO <sub>2</sub>	1.05E-05	0.43
Cl	5.39E-05			Cl	6.18E-05	Cl	6.01E-05	-1.43
SO <sub>4</sub>	2.60E-06			SO <sub>4</sub>	1.10E-05	SO <sub>4</sub>	1.04E-05	-2.53
HCO <sub>3</sub>	9.00E-05			HCO <sub>3</sub>	2.91E-03	HCO <sub>3</sub>	2.83E-03	-1.32
pH	7.21	Illit	3.19E-06	pH	8.25	pH	8.25	
pe	7.79	SiO <sub>2</sub> (a)	4.84E-06	pe	6.88	pe	6.87	
		Piroluzyt	8.82E-11					
		Hematyt	3.60E-11					

\* obliczony wg wzoru:  $|(dane\ pomierzone - dane\ z\ modelu)/(dane\ pomierzone + dane\ z\ modelu) \cdot 100\%$

calculated from the formula:  $|(analytical\ data - data\ from\ model)/(analytical\ data + data\ from\ model) \cdot 100\%$

i wytrącania poszczególnych faz mineralnych występujących w analizowanych obszarach. Następnie wykorzystując obliczone za pomocą geochemicznego modelu wprost rozpuszczone masy poszczególnych faz mineralnych i ich gęstości, obliczono sumaryczną objętość minerałów rozpuszczonych w jednostce roztworu:

$$d = \sum_{j=1}^n \frac{m_j}{\zeta_j} \quad [1]$$

gdzie:

- $d$  – sumaryczna objętość minerałów rozpuszczonych w jednostce roztworu [-],
- $m_j$  – masa minerału  $j$  rozpuszczonego w jednostce roztworu [g/dm<sup>3</sup>],
- $\zeta_j$  – gęstość minerału  $j$  [g/dm<sup>3</sup>].

Dane te wraz z pomierzonymi objętościami przepływu oraz powierzchnią zlewni (obliczoną za pomocą programu ArcView GIS 3.2) posłużyły do ilościowej oceny denudacji chemicznej poligonu badawczego. Ze względu na zmienność w czasie zarówno objętości przepływu, jak i sumarycznej objętości rozpuszczonych minerałów badany okres podzielono na przedziały czasowe. Każdemu przedziałowi czasowemu przypisano średnią arytmetyczną objętość przepływu i sumaryczną objętość rozpuszczonych minerałów. Następnie obliczono denudację chemiczną:

$$D_{ch} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i \cdot \Delta t_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n \Delta t_i} \cdot P^{-1} \cdot 0,365 \quad [2]$$

gdzie:

- $D_{ch}$  – denudacja chemiczna [m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>·rok],
- $P$  – powierzchnia zlewni [km<sup>2</sup>],
- $Q_i$  – odpływ całkowity w danym przedziale czasowym  $\Delta t_i$  [dm<sup>3</sup>/d],
- $d_i$  – sumaryczna objętość minerałów rozpuszczonych w danym przedziale czasowym  $\Delta t_i$  w jednostce roztworu [-],
- $\Delta t_i$  – przyjęty przedział czasowy [d].

Otrzymane wyniki porównano z wartościami denudacji chemicznej badanego poligonu, obliczonymi dla tych samych okresów wzorem Puliny (1999):

$$D_{ch} = \alpha \frac{\Delta T \cdot Q}{P} \quad [3]$$

gdzie:

- $D_{ch}$  – denudacja chemiczna [m<sup>3</sup>/km<sup>2</sup>·rok],
- $\alpha$  – współczynnik przeliczeniowy zależny od gęstości rozpuszczanych skał; umożliwia ujednoczenie jednostek we wzorze [3]; dla węglanów, siarczanów i chlorków przyjmuje wartość 12,6 [-],
- $\Delta T = T - T_a$ , gdzie  $\Delta T$  – mineralizacja wód będąca wynikiem procesu rozpuszczania w badanym obszarze krasowym [mg/dm<sup>3</sup>],  $T$  – zawartość rozpuszczonych soli w wodzie opuszczającej badany obszar lub w miejscu zamknięcia zlewni krasowej [mg/dm<sup>3</sup>],  $T_a$  – mineralizacja wód pochodząca spoza badanego obszaru lub zlewni [mg/dm<sup>3</sup>],
- $Q$  – średnia roczna wielkość odpływu wód z badanego obszaru lub zlewni krasowej [m<sup>3</sup>/s],
- $P$  – faktyczna powierzchnia badanego obszaru lub zlewni krasowej [km<sup>2</sup>].

Wartości denudacji chemicznej zlewni potoku Białego obliczone nową metodą z wykorzystaniem modelu geochemicznego – wzór [2] są mniejsze niż obliczone metodą hydrologiczną – wzór [3] (fig. 2). Różnica ta wynika z nieuwzględnienia w metodzie hydrologicznej:

- udziału dwutlenku węgla w rozpuszczaniu węglanów; czynnik ten znacząco wpływa na wartość denudacji chemicznej badanego obszaru, gdyż zlewnia potoku Białego jest zbudowana głównie z utworów węglanowych;
- parowania terenowego, powodującego zateżnienie składników rozpuszczonych w wodach opadowych;
- zróżnicowanej gęstości i rozpuszczalności minerałów, wartości niezbędnych do prawidłowej oceny objętości usuniętej masy skalnej.

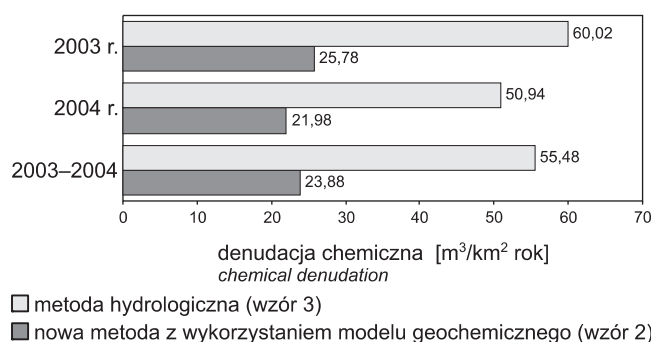


Fig. 2. Porównanie denudacji chemicznej zlewni potoku Białego obliczonej różnymi metodami

Comparison of chemical denudation of Biały Stream catchment calculated with different methods

## PODSUMOWANIE

Wykonane badania wykazały, że wartości denudacji chemicznej określane metodami hydrologicznymi z wykorzystaniem mineralizacji ogólnej wód są wyraźnie większe niż w przypadku obliczeń metodą z wykorzystaniem modelowania geochemicznego. Zatem powszechnie stosowane metody hydrologiczne mogą prowadzić do niedoszacowania czasu powstania rzeźby masywów krasowych.

Obecnie w ramach realizacji projektu badawczego nr N N 307 2641 33, finansowanego przez MNiSW, prowadzone są badania nad weryfikacją nowej metody wykorzystującej model numeryczny. Weryfikacja ta jest wykonywana

na dwuetapowo: (1) przez **jakościową** identyfikację procesów zachodzących w warstwie wodonośnej, polegającą na ocenie zmian wietrzeniowych zachodzących w płytkach cienkich, wykonanych ze skał budujących poligon i umieszczonych w warstwie wodonośnej, oraz (2) **ilościową** ocenę rozpuszczonej masy pastylek skalnych umieszczonych na powierzchni terenu, wystawionych na działanie czynników atmosferycznych, i pastylek skalnych umieszczonych w warstwie wodonośnej. Będą to badania wieloletnie, przy czym oceny będą dokonywane corocznie.

## LITERATURA

- ALLEN P.A., 2000 – Procesy kształtujące powierzchnię Ziemi. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- APPELO C.A.J., POSTMA D., 1993 – Geochemistry groundwater and pollution. Rotterdam.
- BAC-MOSZASZWILI M., 1998 – Budowa geologiczna jednostek reglowych Tatr Zachodnich. *Stud. Geol. Pol.*, **3**: 113–136.
- BAC-MOSZASZWILI M., BURCHART J., GŁAZEK J. i in., 1979 – Mapa geologiczna Tatr Polskich w skali 1:30 000. Wyd. Geol., Warszawa.
- BAK B., PIESTRZYŃSKI A., RADWANIEK-BAK B., 1994 – Dawne górnictwo kruszcowe i rud żelaza w Tatrach. *Pr. Spec. PTM*, **5**: 54–57.
- BLANCKENBURG F., 2005 – The controll mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment. *Earth and Planetary Science Letters*, **237**: 462–479.
- BOLEWSKI A., MANECKI A., 1993 – Mineralogia szczegółowa. Wyd. PAE, Warszawa.
- CAMPBELL S.W., DIXON J.C., THORN C.E., DARMODY R.G., 2002 – Chemical denudation rates in Karkevage Swedish Lapland. *Geor. An.*, **84**: 179–185.
- DIXON J.C., THORN C.E., 2005 – Chemical weathering and landscape development in mid-latitude alpine environments. *Geomorphology*, **67**: 127–145.
- DOWGIAŁŁO J., KLECZKOWSKI A.S., MACIOSZCZYK T., RÓŻKOWSKI A. (red.), 2002 – Słownik hydrogeologiczny. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DUBLYANSKIY V.N., 1980 – Chemical denudation in the karst areas of the Ukrainian Carpathians, Crimea and Caucasus. *Kras i Speleologia*, **3**: 34–44.
- GABET E.J., 2007 – A theoretical model coupling chemical weathering and physical erosion in landslide-dominated landscapes. *Earth and Planetary Science Letters*, **264**: 259–265.
- GEBECZAW D.S., 1977 – K metodike ocenki chmicheskoy denudacii. Meroprijatija po povyszeniju ustojczyvosti zemlianogo polotna w karstowych rajonach. Wyd. BAM, Krasnojarsk.
- GUZIK K., GUZIK S., JACZYŃSKA W., SOKOŁOWKI S., 1955 – Mapa geologiczna Tatr w skali 1:10 000, ark. Łysanki. Wyd. Geol., Warszawa.
- HABIČ F., 1968 – Kraški svet med Idrijco in Vipavo. Wyd. SAZU, Ljubljana.
- KARLIKOWSKA J., RATAJCZAK T., WITCZAK S., 2003 – Modelowanie hydrogeochemiczne procesów kształtujących skład wód podziemnych strefy zasilania Subzbiornika Bogucice (GZWP 451). *Zesz. Nauk. PŚL*, **256**: 119–124.
- KIRCHNER J.W., REIEBE C.S., FERRIER K.L., FINKEL R.C., 2006 – Cosmogenic nuclide methods for measuring long-term rates of physical erosion and chemical weathering. *J. Geochem. Explor.*, **88**: 296–299.
- KORCZYŃSKA-OSZACKA B., 1977 – Tlenki manganu powstałe jako produkty utlenienia tatrzańskich wapieni manganowych w Dolinie Chochołowskiej. *Spr. z Pos. Kom. Nauk. PAN Oddz. w Krakowie* za okres lipiec–grudzień 1976, **20**, 2: 441–442.
- KORCZYŃSKA-OSZACKA B., 1979 – Minerale węglanowe skał manganowych Doliny Chochołowskiej (Tatry). *Pr. Min.*, **54**: 67–77.
- MACIOSZCZYK A., DOBRZYŃSKI D., 2002 – Hydrogeochemia strefy aktywnej wymiany wód podziemnych. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- MACIOSZCZYK A., WITCZAK S., 1999 – Współczesne problemy hydrogeochemii. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **388**: 139–156.
- MAŁECKI J.J., 1995 – Role of the zone of aeration in the formation of groundwater chemical composition. *Geol. Quart.*, **39**, 3: 439–448.
- MAŁECKI J.J., SZOSTAKIEWICZ M., 2004 – Quantitative estimates of chemical denudation rates of the Suchy stream drainage basin (Podhale Basin) using numerical models. *W: Hydrogeochemia 04*, VIII: 61–65. Wyd. VSB-TU Ostrava.
- MAŁECKI J.J., SZOSTAKIEWICZ M., 2005 – Ocena denudacji chemicznej na przykładzie wybranej zlewni Karpat wewnętrznych. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 12: 819–824. Wyd. UMK, Toruń.
- MAŁECKI J.J., SZOSTAKIEWICZ M., 2006 – The role of evapotranspiration in the formation of the chemical composition of shallow groundwater (the Polish Tatras). *Acta Geol. Pol.*, **56**, 4: 485–492.
- MATSUKURA Y., HIROSE T., 1999 – Five year measurements of rock tablet weathering on a forested hillslope in a humid temperate region. *Eng. Geol.*, **55**: 69–76.
- MICHALIK K., 1958 – Mapa geologiczna Tatr w skali 1:10 000, ark. Czerwone Wierchy. Wyd. Geol., Warszawa.

- MIHEVIC A., 1996 – Some preliminary results of micrometric measurements in Škocjanske caves, Slovenia. *Kras i Speleologia, UŠl.*, **8**: 66–71.
- MOTTERSLED D., GORBUSHINA A., LUCAS G., WRAGHT J., 2003 – The influence of marine salts, aspect and microbes in the weathering of sandstone in two historic structures. *Build. Envir.*, **38**: 1193–1204.
- PARKHURST D.L., APPELO C.A.J., 1999 – User's guide to PHREEQC (version 2) – a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water Resources Investigations Report: 99–4259. Denver.
- PAWLIKOWSKI M., MAZUREK J., WIECZOREK J., 1997 – Badania mineralogiczno-petrograficzne skał zbiornikowych wód geotermalnych z otworu Biały Dunajec PAN-1. *Gosp. Sur. Miner.*, **13**, 2: 31–238.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B., 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- POLAŃSKI A., 1988 – Podstawy geochemii. Wyd. Geol., Warszawa.
- PULINA M., 1999 – Kras. Formy i procesy. Wyd. UŚl., Katowice.
- RIEBE C.S., KIRCHNER J.W., FINKEL R.C., 2003 – Long-term rates of chemical weathering and physical erosion from cosmogenic nuclides and geochemical balance. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**: 4411–4427.
- STEPHENSON W.J., KIRK R.M., 1996 – Measuring erosion rates using the micro-erosion meter: 20 years of data from shore platforms, Kaikoura Peninsula, South Island, New Zealand. *Marine Geol.*, **131**: 209–218.
- SZOSTAKIEWICZ M., 2005 – Ocena denudacji chemicznej wybranych zlewni Karpat wewnętrznych. Bibl. Wydziału Geologii UW.
- TRUDGILL S.T., VILES H.A., INKPEN R. i in., 2001 – Twenty-year weathering remeasurements at St Paul's Cathedral, London. *Earth Surfaces Process and Landforms*, **26**: 1129–1142.
- TURNAU-MORAWSKA M., 1953 – Kajper tatrzański, jego petrografia i sedymentologia. *Acta Geol. Pol.*, **3**, 1: 33–102.

## SUMMARY

Chemical denudation is a set of many processes operating within the aquifer. There are a number of methods for its quantitative evaluation, used by geomorphologists, hydrologists and geochemists. However, the methods take no account of the whole of processes affecting the chemical denudation rates. This problem can be solved by using modern numerical models. The paper presents the application of a new method of quantitative evaluation of chemical denudation using a numerical geochemical model. The test area was the Biały Stream drainage basin (West Tatra Mts.). The re-

search results were compared with those obtained by calculations made for the same area during the same period using a classical hydrological method. Higher chemical denudation rates acquired using the hydrological method result from the fact that the hydrological method does not involve the following factors: a role of carbon dioxide in carbonate solubility, a physical process of concentrating constituents dissolved in rainwater due to its evaporation, and different densities and solubilities of individual minerals.